



TUGAS AKHIR - TM141585

**STUDI EKSPERIMEN PENGARUH SILINDER SINGKULAR  
SEBAGAI PENGANGGU ALIRAN DI DEPAN SISI  
*RETURNING BLADE* TERHADAP PERFORMA TURBIN  
ANGIN SAVONIUS**

**“Studi Kasus Untuk  $(d/D) = 0,2$ ;  $(S/D) = 1,2 \leq S/D \leq 2,1$ ;  $(Re) = 6 \times 10^4$ ,  
 $7,5 \times 10^4$ ,  $9 \times 10^4$ ”**

ADHI HERTAMTOMO PUTRO

NRP. 2112 100 063

Dosen Pembimbing

Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA

JURUSAN TEKNIK MESIN

Fakultas Teknologi Industri

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya 2017



**TUGAS AKHIR - TM141586**

**STUDI EKSPERIMEN PENGARUH SILINDER SIRKULAR  
SEBAGAI PENGANGGU ALIRAN DI DEPAN SISI  
*RETURNING BLADE* TERHADAP PERFORMA TURBIN  
ANGIN *SAVONIUS***

**“ Studi Kasus Untuk  $(d/D) = 0,2$  ;  $(S/D) = 1,2 \leq S/D \leq 2,1$  ;  $(Re) = 6 \times 10^4$  ,  $7.5 \times 10^4$  ,  $9 \times 10^4$  ”**

**ADHI HERTAMTOMO PUTRO**  
NRP. 2112 100 063

Dosen Pembimbing  
Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA

JURUSAN TEKNIK MESIN  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2017



**FINAL PROJECT - TM141585**

**EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECT OF CIRCULAR CYLINDER AS A FLOW DISTURBANCE IN FRONT OF THE SAVONIUS WIND TURBINE RETURNING BLADE POSITION TO THE PERFORMANCE OF THE TURBINE**

**“Study case for  $(d/D) = 0,2$  ;  $(S/D) = 1,2 \leq S/D \leq 2,1$  ;  $(Re) = 6 \times 10^4, 7.5 \times 10^4, 9 \times 10^4$ ”**

**ADHI HERTAMTOMO PUTRO**

**NRP. 2112 100 063**

**Supervising Lecturer**

**Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA**

**MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT**

**Faculty of Industrial Technology**

**Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

**Surabaya 2017**

**STUDI EKSPERIMEN PENGARUH SILINDER SINGKULAR  
SEBAGAI PENGANGGU ALIRAN DI DEPAN SISI  
RETURNING BLADE TERHADAP PERFORMA TURBIN  
ANGIN SAVONIUS**

“Studi Kasus untuk  $(d/D) = 0,2$ ;  $(S/D) = 1,2 \leq (S/D) \leq 2,1$ ; Bilangan  
*Reynolds* =  $6 \times 10^4$ ,  $7,5 \times 10^4$  dan  $9 \times 10^4$ ”

**TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada  
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

**ADHI HERTAMTOMO PUTRO**

NRP. 2112 100 063

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Prof.Dr.Ir. Triyogi Yuwono,DEA. (Pembimbing)  
NIP. 196001291987011001
2. Prof. Ir. Sutardi M.Eng., PhD. (Penguji I)  
NIP. 196412281990031002
3. Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT. (Penguji II)  
NIP. 197104051997021001
4. Dr. Ir. Heru Mirmanto, MT. (Penguji III)  
NIP. 196202161995121001

**SURABAYA**

**JANUARI, 2017**

**STUDI EKSPERIMEN PENGARUH SILINDER  
SIRKULAR SEBAGAI PENGANGGU ALIRAN DI  
DEPAN SISI RETURNING BLADE TERHADAP  
PERFORMA TURBIN ANGIN *SAVONIUS***

“ Studi Kasus Untuk  $(d/D)=0,2$  ;  $(S/D) = 1,2 \leq S/D \leq 2,1$  ;  $(Re) = 6 \times 10^4, 7.5 \times 10^4, 9 \times 10^4$ ”

**Nama Mahasiswa : Adhi Hertamtomo Putro**

**NRP : 2112100063**

**Jurusan : Teknik Mesin FTI – ITS**

**Dosen Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA**

**ABSTRAK**

Energi fosil merupakan energi yang tidak dapat diperbaharui. Melihat terbatasnya kandungan energi fosil maka perlu mencari alternatif energi lain untuk memenuhi konsumsi energi di Indonesia. Salah satu energi terbarukan yang belum dimanfaatkan secara maksimal adalah energi angin. Dalam hal ini dengan memanfaatkan turbin angin *Savonius*. Turbin angin *Savonius* merupakan turbin angin dengan sumbu vertikal yang memiliki dua sudu yaitu *advancing blade* dan *returning blade*. Turbin ini memanfaatkan angin dengan massa dan kecepatan tertentu sebagai penggerakannya. Angin yang bergerak tersebut akan mengakibatkan adanya gaya drag yang diterima turbin. Gaya drag yang diterima turbin akan menghasilkan torsi pada turbin. Torsi total turbin adalah selisih torsi yang diterima oleh kedua sudu pada turbin *Savonius*. Dari torsi total tersebut akan didapatkan daya keluaran turbin. Penelitian ini membahas tentang pemanfaatan energi angin sebagai penghasil listrik dengan menggunakan turbin angin *Savonius* yang diberi pengganggu berupa silinder sirkular di depan *returning blade* agar daya yang dihasilkan meningkat. Untuk mengetahui pengaruh paling efektif maka diberikan variasi jarak antara sumbu silinder sirkular dengan sumbu *returning blade* turbin *Savonius*.

Penelitian ini dilakukan pada sebuah *wind tunnel subsonic open circuit* dengan kecepatan maksimal yang mampu dihasilkan sebesar 26 m/s. Diameter sudu turbin *Savonius* yang digunakan yaitu 60 mm dan tinggi sudu yaitu 80 mm. Penghalang yang digunakan berupa silinder sirkular dengan diameter 12 mm dan diletakkan di depan *returning blade*. Sedangkan variasi yang digunakan dalam penelitian ini adalah bilangan *Reynolds* (Re) dan jarak antara pusat penghalang dengan pusat *returning blade* (S/D). Variasi (Re) yang digunakan berturut – turut adalah  $6 \times 10^4$ ,  $7.5 \times 10^4$ , dan  $9 \times 10^4$  (dihitung berdasarkan kecepatan *free stream* U dan panjang karakteristik  $L=2D-b$ ), sedangkan variasi (S/D) yang digunakan yaitu  $1,2 \leq S/D \leq 2,1$  dengan penambahan sebesar 0,1.  $Re = 6 \times 10^4$  ditentukan dari kecepatan angin minimum yang mampu memutar turbin,  $Re = 9 \times 10^4$  ditentukan dari kecepatan angin maksimum yang dapat dihasilkan oleh *wind tunnel*. Pengukuran dilakukan pada suhu ruangan yakni 26°C. Kecepatan aliran angin diukur dengan menggunakan *pitot static tube* dan diamati dengan manometer. Putaran dari turbin diukur dengan *tachometer*. Torsi statis diukur dengan menggunakan *torque meter*. Daya yang dihasilkan turbin didapatkan dari pengukuran arus dan tegangan listrik yang keluar dari motor listrik dengan menggunakan multimeter.

Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa pemberian pengganggu dapat meningkatkan performa turbin *Savonius* yang diteliti, yang ditandai dengan peningkatan nilai putaran (n), torsi statis (T), dan *Coefficient of Power* (CoP) jika dibandingkan dengan turbin tanpa pemberian pengganggu berupa silinder sirkular. Peningkatan putaran maksimum didapatkan pada  $S/D = 1,4$  untuk  $Re = 9 \times 10^4$  sebesar 160%. Peningkatan torsi statis maksimum didapatkan pada  $S/D = 1,4$  untuk  $Re = 9 \times 10^4$  sebesar 145%. Peningkatan *Coefficient of Power* maksimum didapatkan pada  $S/D = 1,4$  untuk  $Re = 6 \times 10^4$  sebesar 727%. Nilai *Coefficient of Power* maksimum didapatkan pada  $TSR = 0,4046$ .

**(Kata kunci: Energi angin, Turbin *Savonius*, *Coefficient of Power*)**

**EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECT OF  
CIRCULAR CYLINDER AS A FLOW DISTURBANCE  
IN FRONT OF THE SAVONIUS WIND TURBINE  
RETURNING BLADE POSITION TO THE  
PERFORMANCE OF THE TURBINE**

“Study case for  $(d/D) = 0,2$  ;  $(S/D) = 1,2 \leq S/D \leq 2,1$  ;  $(Re) = 6 \times 10^4, 7.5 \times 10^4, 9 \times 10^4$ ”

**Student's name** : Adhi Hertamtomo Putro  
**NRP** : 2112100063  
**Department** : Mechanical Engineering  
**Supervising Lecture** : Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA

**ABSTRACT**

Savonius wind turbine is a type of turbine that has been widely used to obtain alternative non-fossil energy in the era of the current energy crisis, even though this type of turbine has low performance. In principle, the Savonius turbine works caused by the difference of the drag force generated by its turbine blades, advancing and returning blades. A disturbance in the form of circular cylinder is placed in front of returning blade is expected to improve the performance of Savonius Turbine.

In order to increasing performance of Savonius wind turbine having a diameter **D** of mm and height **h** of 80 mm, an obstacle cylinder having a diameter **d** of 12 mm is used as a disturbance located in front of returning blade of turbine. This disturbance is located in various spacing positions of **S/D** = 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7, 1.8, 1.9, 2.0, and 2.1. The experiments are carried out in a subsonic open circuit wind tunnel. This facility has a 2980 mm long, with test section 304 mm x 304 mm. The free stream velocity of wind tunnel could be adjusted to 8.83 m/s, 11.03 m/s, 13.24 m/s, corresponding respectively to Reynolds number **Re** =  $6.0 \times 10^4$ ,  $7.5 \times 10^4$ ,  $9.0 \times 10^4$  (based on equivalent length of  $L = 2D - b$ , where  $b$  is the width of overlap of the two turbine blades, and

the free stream velocity). The velocity of wind is measured using a pitot-static tube connected to the inclined manometer. The rotation of turbine is measured by tachometer. The static torque is measured by torquemeter, and finally the power output of turbine is determined by measuring of voltage and electric current resulted by generator connecting to the shaft of Savonius turbine.

The results show that addition of the circular cylindrical disturbance can increase the performance of *Savonius* turbine used in the experiment. It is evidenced by the increasing of rotation ( $n$ ), static torque ( $T$ ), and coefficient of power ( $CoP$ ) when compared to the no circular cylindrical disturbance turbine. The maximum rotation increment is obtained at  $S/D = 1,4$  on  $Re = 9 \times 10^4$  as much as 160%. The maximum static torque increment is obtained at  $S/D = 1,4$  on  $Re = 9 \times 10^4$  as much as 145%. The maximum  $CoP$  increment is obtained at  $S/D = 1,4$  on  $Re = 6 \times 10^4$  as much as 727%. The maximum  $CoP$  is obtained at a TSR value of 0,4046.

**(Keywords: wind energy, Savonius turbine, coefficient of power)**



## KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang telah memberikan karunia dan anugerah-Nya serta junjungan seluruh umat Islam Nabi Muhammad SAW yang telah mengajarkan arti kesabaran dan kegigihan sehingga penulis mampu menyelesaikan tugas akhir dengan judul **STUDI EKPERIMEN PENGARUH SILINDER Sirkular sebagai PEGANGGU ALIRAN DI DEPAN SISI *RETURNING BLADE* TERHADAP PERFORMA TURBIN ANGIN *SAVONIUS*** "Studi Kasus Untuk  $(d/D)=0,2$ ;  $(S/D)=1,2 \leq S/D \leq 2,1$ ;  $(Re)=6 \times 10^4, 7,5 \times 10^4, 9 \times 10^4$ ". Tidak lupa pula beribu terima kasih penulis ucapkan kepada:

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA, selaku dosen pembimbing yang telah banyak meluangkan waktu, tenaga, serta ilmu yang tak ternilai harganya.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Sutardi, M.Eng, Bapak Dr. Ir. Heru Mirmanto, MT, dan Bapak Dr. Wawan Aries Widodo, ST. MT, selaku dosen penguji yang telah memberikan kritik dan saranya kepada penulis.
3. Bapak Sugiyono, Ibu Sri Sarwosih, Viya, Nana, dan Angesti yang selalu memberi doa dan dukungan kepada penulis untuk segera menyelesaikan studi S1 di Teknik Mesin FTI-ITS.
4. Teman – teman BPH KURO, para punggawa LBMM, dan M55 yang selalu memberikan canda dan tawa setiap hari.
5. Semua pihak yang telah membantu menyelesaikan Tugas Akhir ini yang tidak dapat penulis sebutkan satu – persatu.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penyusunan Tugas Akhir ini, oleh karena itu saran dan masukan dari semua pihak sangat penulis harapkan.

Surabaya, Januari 2017  
Penulis

*{Halaman ini sengaja dikosongkan.}*

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b>	
<b>LEMBAR PENGESAHAN</b>	
<b>ABSTRAK</b> .....	iii
<b>ABSTRACT</b> .....	v
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	vii
<b>DAFTAR ISI</b> .....	ix
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xiii
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xvii
<b>DAFTAR SIMBOL DAN SATUAN</b> .....	xix
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	1
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Perumusan Masalah.....	4
1.3. Tujuan Penelitian .....	5
1.4. Batasan Masalah.....	5
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	7
2.1. Aliran Laminar dan Turbulen .....	7
2.2. Aliran Melintasi Sebuah Silinder Sirkular .....	7
2.3. Turbin Angin .....	10
2.4. Turbin Angin <i>Savonius</i> .....	11
2.5. Perhitungan Power Turbin dan <i>Coefficient of</i> <i>Performance</i> (CoP) .....	12
2.6. <i>Coeffisien Drag</i> .....	13
2.7. Bilangan Reynolds.....	15
2.8. Penelitian Terdahulu .....	16
2.8.1. Penelitian Silinder dengan Penganggu .....	16
2.8.2. Penelitian tentang Peningkatan Peforma dari Turbin <i>Savonius</i> .....	23
<b>BAB III METODE PENELITIAN</b> .....	27
3.1. Parameter yang Diukur .....	27
3.2. Analisa Dimensi.....	28
3.2.1. Analisa Dimensi untuk <i>Coefficient of</i> <i>Power</i> ( CoP ) .....	28
3.3. Metode Eksperimen .....	31

3.3.1. Benda Uji.....	31
3.3.2. <i>Wind Tunnel</i> (Terowongan Angin).....	32
3.3.3. Alat Ukur .....	33
3.4. Pengukuran Daya yang Dihasilkan Turbin .....	35
3.5. Prosedur Penelitian.....	36
3.6. Flowchart Pengambilan Data .....	37
3.7. <i>Time Line</i> Penelitian.....	39
<b>BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>41</b>
4.1. Data Penelitian.....	41
4.2. Contoh Perhitungan .....	43
4.2.1. Perhitungan <i>Coefficient of Power</i> (CoP) .....	43
4.2.2. Perhitungan <i>Tip Speed Ratio</i> (TSR) .....	44
4.3. Analisa Performa Turbin Angin <i>Savonius</i> tanpa Penggangu dengan Variasi Bilangan Reynolds yang Digunakan $6 \times 10^4$ ; $7,5 \times 10^4$ ; dan $9 \times 10^4$ .....	45
4.3.1. Analisa Putaran Turbin Angin <i>Savonius</i> tanpa Penggangu .....	46
4.3.2. Analisa Torsi Statis Turbin Angin <i>Savonius</i> tanpa Penggangu .....	47
4.3.3. Analisa <i>Coefficient of Power</i> Turbin Angin <i>Savonius</i> tanpa Penggangu .....	48
4.4. Analisa Performa Turbin Angin <i>Savonius</i> Berpengganggu dengan Variasi S/D dan Bilangan Reynolds yang Digunakan Berturut – turut Adalah $1,2 \leq S/D \leq 2,1$ dan $6 \times 10^4$ ; $7,5 \times 10^4$ ; dan $9 \times 10^4$ .....	50
4.4.1. Analisa Putaran Turbin Angin <i>Savonius</i> Berpengganggu .....	50
4.4.2. Analisa Torsi Statis Turbin Angin <i>Savonius</i> Berpengganggu .....	53
4.4.3. Analisa <i>Coefficient of Power</i> (CoP) Turbin Angin <i>Savonius</i> Berpengganggu.....	56
4.4.4. Analisa <i>Coefficient of Power</i> (CoP) Turbin Angin <i>Savonius</i> Berpengganggu terhadap Perubahan <i>Tip Speed Ratio</i> (TSR).....	61
4.5. Analisa Performa Turbin Angin <i>Savonius</i>	

Berpengganggu dengan S/D sebesar 1,4 dan Variasi Bilangan Reynolds yang Digunakan $4,72 \times 10^4 \leq Re \leq 10^5$ .....	64
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN</b> .....	67
5.1. Kesimpulan .....	67
5.2. Saran .....	68
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	69
<b>LAMPIRAN</b> .....	71
<b>BIODATA PENULIS</b> .....	77

*{Halaman ini sengaja dikosongkan.}*

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Mekanisme terjadinya separasi pada aliran melewati silinder .....	8
Gambar 2.2. Mekanisme terjadinya separasi pada aliran melewati silinder berpengganggu.....	9
Gambar 2.3. Penamaan bagian turbin angin <i>Savonius</i> .....	11
Gambar 2.4. Geometri benda uji .....	16
Gambar 2.5. Grafik bilangan Strouhal dan koefisien <i>drag</i> .....	17
Gambar 2.6. Grafik distribusi tekanan pada silinder sirkuler utama .....	17
Gambar 2.7. Skema alat silinder pengganggu Tipe I yang disusun tandem dengan silinder utama.....	19
Gambar 2.8. Grafik $C_D/C_{D0}$ terhadap sudut iris silinder pengganggu .....	19
Gambar 2.9. Visualisasi aliran pada silinder utama .....	20
Gambar 2.10. Visualisasi aliran pada silinder berpengganggu tipe I.....	20
Gambar 2.11. Distribusi tekanan ( $C_p$ ) pada aliran melalui silinder berpengganggu tipe I pada berbagai sudut potong .....	21
Gambar 2.12. Profil kecepatan pada aliran melalui silinder berpengganggu tipe I pada berbagai sudut potong.....	22
Gambar 2.13. Skema susunan pengganggu pada turbin angin <i>Savonius</i> .....	23
Gambar 2.14. Grafik pengaruh panjang pengganggu terhadap <i>Coefficient of Power</i> .....	24
Gambar 2.15. Grafik pengaruh putaran turbin terhadap besar sudut plat ( $\alpha$ dan $\beta$ ) pada pengganggu 1 .....	24
Gambar 2.16. Skema susunan pengganggu pada turbin angin tipe <i>Savonius</i> dengan dua sudu dan tiga sudu....	25
Gambar 2.17. Grafik hubungan antara <i>speed ratio</i> dan <i>power coefficient</i> ( $C_p$ ) pada turbin angin <i>Savonius</i> dengan dua sudu .....	25

Gambar 3.1. Skema Penelitian ( <i>top view</i> ) .....	27
Gambar 3.2. Turbin Angin <i>Savonius</i> .....	31
Gambar 3.3. Sketsa Benda Pengganggu Berupa Silinder Sirkular .....	32
Gambar 3.4. Skema <i>Wind Tunnel Sub Sonic</i> .....	32
Gambar 3.5. Tachometer OMEGA seri HHT12 .....	33
Gambar 3.6. Torque meter LUTRON model : TQ-8800 .....	33
Gambar 3.7. Pitot Static Tube .....	34
Gambar 3.8. Manometer .....	34
Gambar 3.9. Sanwa Multimeter Digital CD-771 .....	35
Gambar 3.10. Skema rangkaian untuk pengukuran daya turbin .....	35
Gambar 3.11. <i>Flowchart</i> pengambilan data .....	38
Gambar 4.1. Grafik putaran turbin angin <i>Savonius</i> tanpa pengganggu sebagai fungsi <i>Reynolds Number</i> ....	46
Gambar 4.2. Grafik torsi statis turbin angin <i>Savonius</i> tanpa pengganggu sebagai fungsi <i>Reynolds Number</i> ....	47
Gambar 4.3. Grafik <i>Coefficient of Power</i> turbin angin <i>Savonius</i> tanpa pengganggu sebagai fungsi <i>Reynolds Number</i> .....	48
Gambar 4.4. Grafik putaran turbin angin <i>Savonius</i> berpengganggu sebagai fungsi S/D pada $Re = 6 \times 10^4$ ; $7,5 \times 10^4$ ; dan $9 \times 10^4$ .....	50
Gambar 4.5. Grafik peningkatan putaran turbin angin <i>Savonius</i> berpengganggu terhadap putaran standar sebagai fungsi S/D pada $Re = 6 \times 10^4$ ; $7,5 \times 10^4$ ; dan $9 \times 10^4$ .....	51
Gambar 4.6. Grafik torsi statis turbin angin <i>Savonius</i> berpengganggu sebagai fungsi S/D pada $Re = 6 \times 10^4$ ; $7,5 \times 10^4$ ; dan $9 \times 10^4$ .....	53
Gambar 4.7. Grafik peningkatan torsi statis turbin angin <i>Savonius</i> berpengganggu terhadap torsi statis standar sebagai fungsi S/D pada $Re = 6 \times 10^4$ ; $7,5 \times 10^4$ ; dan $9 \times 10^4$ .....	55
Gambar 4.8. Grafik <i>Coefficient of Power</i> turbin angin	



	<i>Savonius</i> berpengganggu sebagai fungsi S/D pada $Re = 6 \times 10^4$ ; $7,5 \times 10^4$ ; dan $9 \times 10^4$ .....	57
Gambar 4.9.	Grafik peningkatan <i>Coefficient of Power</i> turbin angin <i>Savonius</i> berpengganggu terhadap <i>Coefficient of Power</i> standar sebagai fungsi S/D pada $Re = 6 \times 10^4$ ; $7,5 \times 10^4$ ; dan $9 \times 10^4$ .....	59
Gambar 4.10.	Grafik <i>Coefficient of Power</i> turbin angin <i>Savonius</i> berpengganggu sebagai fungsi TSR pada $Re = 6 \times 10^4$ ; $7,5 \times 10^4$ ; dan $9 \times 10^4$ .....	61
Gambar 4.11.	Grafik CoP (%) turbin angin <i>Savonius</i> berpengganggu terhadap TSR pada setiap S/D silinder pengganggu dan $Re = 6 \times 10^4$ ; $7,5 \times 10^4$ ; dan $9 \times 10^4$ .....	62
Gambar 4.12.	Grafik <i>Coefficient of Power</i> turbin angin <i>Savonius</i> berpengganggu sebagai fungsi Re pada S/D = 1,4 .....	64

*{Halaman ini sengaja dikosongkan.}*

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Koefisien drag untuk berbagai bentuk benda pada Re $\geq$ 1000 .....	14
Tabel 2.2. Konfigurasi Panjang Plat penghalang .....	24
Tabel 3.1. <i>Time Line</i> Penelitian .....	39

*{Halaman ini sengaja dikosongkan.}*

## DAFTAR SIMBOL DAN SATUAN

D	diameter sudu turbin <i>Savonius</i> (m)
H	tinggi turbin <i>Savonius</i> (m)
A	luas sapuan pada turbin <i>Savonius</i> yang ditabrak oleh angin (m <sup>2</sup> )
d	diameter benda pengganggu (m)
t	panjang silinder pengganggu (m)
b	<i>overlap</i> (m)
S	jarak antara pusat silinder pengganggu dengan pusat <i>returning blade</i> (m)
L	panjang karakteristik turbin <i>Savonius</i> (m)
R	jari jari turbin <i>Savonius</i> (m)
C <sub>D</sub>	koefisien <i>drag</i>
F <sub>D</sub>	gaya <i>drag</i> (N)
V	tegangan listrik (volt)
I	arus listrik (ampere)
P	daya (Watt)
CoP	<i>Coefficient of Power</i>
CoP <sub>0</sub>	<i>Coefficient of Power</i> standar
n	putaran poros turbin (rpm)
n <sub>0</sub>	putaran poros turbin standar (rpm)
T	torsi statis turbin (Ncm)
T <sub>0</sub>	torsi statis turbin standar (Ncm)
Re	bilangan Reynolds
U <sub>∞</sub>	Kecepatan <i>free stream</i> (m/s)
ρ	Densitas fluida (kg/m <sup>3</sup> )
μ	viskositas fluida (Ns/m <sup>2</sup> )
Re	bilangan Reynolds
ṁ	laju aliran massa (kg/s)
U <sub>∞</sub>	kecepatan <i>freestream</i> (m/s)
TSR	<i>tip speed ratio</i>
ω	kecepatan angular turbin <i>Savonius</i> (rad/s)

*{Halaman ini sengaja dikosongkan.}*

# **BAB 1**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Indonesia adalah Negara kepulauan terbesar di dunia dengan gugusan ratusan ribu pulau yang membentang luas dari wilayah Sabang sampai Merauke. Wilayah Indonesia yang demikian luas ini mengandung sumber daya alam dan potensi energi yang sangat melimpah, baik di bawah permukaan tanah maupun di atas permukaan tanah. Di bawah permukaan tanah terkandung mineral batubara, gas, dan minyak bumi yang merupakan hasil proses fosil berjuta tahun yang lalu. Selain itu, dalam hal sumber energi, Indonesia juga mempunyai kandungan energi panas bumi yang melimpah. Ini dilihat dari barisan pegunungan yang melintasi Pulau Sumatra, Jawa hingga ke timur. Selama ini Indonesia sangat bergantung pada energi fosil seperti batubara, gas dan minyak bumi, baik dalam sektor transportasi, industri, dan pembangkit listrik. Akan tetapi energi fosil merupakan energi yang tidak dapat diperbaharui. Melihat terbatasnya kandungan energi batubara, gas, dan minyak bumi di Indonesia maka perlu mencari alternatif energi lain untuk memenuhi konsumsi energi di Indonesia. Salah satu energi terbarukan yang belum dimanfaatkan secara maksimal adalah energi angin.

Pemanfaatan angin di Indonesia masih kurang karena rata – rata kecepatan angin di Indonesia yang relatif lambat. Selain itu keluaran dari Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) frekuensinya tidak konstan karena profil angin yang berubah – ubah. Namun Indonesia dapat memiliki potensi energi angin karena memiliki garis pantai yang panjang sehingga dapat memanfaatkan angin darat dan angin laut. Energi angin perlu diubah menjadi energi listrik agar dapat digunakan dalam berbagai hal. Diperlukan sebuah turbin angin untuk mengubah energi kinetik angin menjadi energi mekanik pada putaran poros turbin.

Selanjutnya, putaran poros turbin ditransmisikan dengan generator listrik untuk menghasilkan energi listrik.

Turbin angin adalah kincir angin yang banyak digunakan untuk membangkitkan listrik. Salah satu jenis turbin angin adalah Turbin Angin Sumbu Vertikal (TASV). TASV memiliki sumbu turbin utama yang disusun tegak lurus. Kelebihan utama jenis ini adalah turbin tidak harus diarahkan ke angin untuk menghasilkan energi listrik. Kelebihan ini sangat berguna di tempat – tempat yang arah anginnya sangat bervariasi. TASV terdiri dari beberapa jenis turbin angin, salah satunya adalah turbin angin *Savonius*. Jenis ini memiliki kemampuan *self-starting* yang bagus, sehingga hanya membutuhkan angin dengan kecepatan rendah untuk dapat memutar turbin. Selain itu, torsi yang dihasilkan turbin angin jenis *Savonius* relatif tinggi (**Sargolzay, 2007**). Turbin angin tipe *Savonius* merupakan turbin dengan konstruksi sederhana pertama kali ditemukan oleh sarjana Finlandia bernama Sigurd J. *Savonius*. Turbin yang termasuk dalam kategori *VAWT* (*Vertical Axis Wind Turbine*) ini memiliki turbin dengan bentuk dasar setengah silinder. Turbin angin *Savonius* adalah jenis turbin angin tipe drag, dimana turbin ini menghasilkan daya dengan memanfaatkan gaya drag yang dihasilkan dari tiap – tiap sudunya. Drag merupakan gaya yang bekerja berlawanan dengan arah angin yang menumbuk sudu (**White, 1986**). Terdapat dua sudu pada turbin *Savonius* yaitu *advancing blade* dan *returning blade*. Untuk mendapatkan daya yang dihasilkan maksimal maka selisih gaya drag antara *advancing blade* dan *returning blade* harus diperbesar.

Penelitian untuk meningkatkan performa dari turbin *Savonius* dengan menempatkan dua buah plat pengganggu dilakukan oleh **B.D. Altan et al (2008)**. Kesimpulan dari penelitian ini yaitu *Coefficient of Power* ( $C_p$ ) dari turbin angin *Savonius* dapat meningkat hingga 38,5% apabila diberi pengganggu dengan susunan yaitu dengan panjang plat pengganggu  $l_1$  sebesar 45cm dan  $l_2$  sebesar 52 cm dengan sudut sudu pengganggu  $\alpha = 45^\circ$  dan  $\beta = 15^\circ$ .



Penelitian yang telah dilakukan oleh **Y Triyogi et al (2009)** berkaitan dengan gaya drag yang direduksi dengan menempatkan sebuah silinder pengganggu di depan silinder sirkular utama. Kesimpulan yang didapatkan yaitu pengurangan koefisien drag silinder sirkular utama adalah ketika diberi silinder pengganggu tipe-I dengan sudut iris  $65^\circ$ . Hal ini dikarenakan daerah wake yang terjadi dibelakang silinder tipe-I  $65^\circ$  sebagai silinder pengganggu sangat besar sehingga mampu menunda letak titik separasi. Besarnya pengurangan gaya drag yang dihasilkan mencapai 52% dibandingkan dengan gaya drag silinder tunggal.

Penelitian turbin angin vertikal jenis *Savonius* dengan variasi jumlah stage dan *phase shift angle* untuk memperoleh daya maksimum telah dilakukan oleh **F.S. Lutfi et al (2013)**. Kesimpulan dari penelitian ini yaitu sistem turbin angin dengan dua *stage* dan sudut fasa  $45^\circ$  mampu menghasilkan daya listrik sebesar  $2,0226 \times 10^{-3}$  W, kecepatan turbin 161,6 rpm pada kecepatan angin 4,6 m/s dan nilai *Coefficient of Power* ( $C_p$ ) maksimum diperoleh saat menggunakan variasi III dengan dua *stage* dan sudut fasa  $45^\circ$  yaitu sebesar 0,159 pada kecepatan angin 4,2 m/s.

Dari studi literatur diatas, sepertinya penggunaan silinder sirkular sebagai pengganggu di depan turbin angin *Savonius* belum pernah dilakukan. Kali ini penulis mencoba meningkatkan performa dari turbin *Savonius* dengan cara memberi pengganggu berupa silinder sirkular di depan *returning blade* dengan beberapa variasi jarak yang berbeda. Cara ini digunakan dengan harapan dapat mengurangi gaya drag pada sisi *returning blade*. Sehingga dalam penelitian ini akan dilakukan studi eksperimen tentang penggunaan silinder sirkular dengan  $d/D = 0,2$  sebagai pengganggu di depan turbin angin *Savonius*, pada bilangan *Reynolds*  $Re = 60000, 75000$ , dan  $90000$  dengan variasi jarak antara silinder sirkular dan turbin angin *Savonius* ( $S/D$ ).

## 1.2 Perumusan Masalah

Pada suatu aliran yang melewati sebuah silinder akan terjadi separasi yang akan menimbulkan terbentuknya daerah *wake*. Daerah *wake* adalah daerah bertekanan rendah yang akan menimbulkan perbedaan tekanan pada sisi *upstream* dan sisi *downstream*. Perbedaan tekanan ini akan menimbulkan gaya drag pada silinder. Pada penelitian **Triyogi, dkk (2009)**, penambahan gangguan pada sisi *upstream* yang melewati silinder sirkular dapat menunda terjadinya separasi. Adanya gangguan tersebut mengakibatkan proses transisi *boundary layer* dari laminar menjadi turbulen pada silinder utama terjadi lebih cepat. Disimpulkan bahwa semakin besar koefisien drag pada *bluff body* pengganggu, pada percobaan ini sudut iris  $65^0$ , semakin efektif dalam menunda separasi pada silinder utama sehingga gaya drag yang terjadi lebih kecil.

Terdapat 2 buah sudu pada turbin angin *Savonius* yaitu *advancing blade* dan *returning blade*. Bagian sudu yang cekung dinamakan *advancing blade*, sedangkan bagian sudu yang cembung dinamakan *returning blade*. Turbin angin *Savonius* dapat berputar karena adanya selisih gaya drag antara sisi *advancing blade* dengan sisi *returning blade*. Dengan menempatkan sebuah silinder sirkular sebagai pengganggu di depan sisi *returning blade*, maka separasi dari sisi *returning blade* akan tertunda. Akibat dari mundurnya separasi ini daerah *wake* dari sisi *returning blade* menyempit. Sehingga gaya drag dari sisi *returning blade* lebih kecil dari pada tidak diberi pengganggu berupa silinder sirkular. Hal ini menyebabkan selisih gaya drag semakin besar, jadi torsi dan daya yang dihasilkan oleh turbin juga semakin besar.

Penelitian ini menggunakan turbin angin *Savonius* dengan diameter ( $D$ ) = 60 mm serta silinder pengganggu berupa silinder sirkular dengan diameter ( $d$ ) = 12 mm. Jarak antara pusat *returning blade* turbin angin dan silinder pengganggu divariasikan dari  $1,2 \leq S/D \leq 2,1$  dengan bilangan *Reynolds*  $Re = 60000, 75000$ , dan  $90000$ . Pada penelitian ini dapat diambil beberapa hipotesa yaitu :

- 1) Penambahan pengganggu berupa silinder sirkular di depan sisi *returning blade* efektif mengurangi gaya drag sisi *returning blade* pada turbin angin *Savonius*. Sehingga, selisih gaya drag antara sisi *returning blade* dengan sisi *advancing blade* akan semakin besar. Akibatnya torsi yang dihasilkan meningkat.
- 2) Variasi S/D yang digunakan akan berpengaruh terhadap nilai selisih gaya drag pada kedua sudu turbin, sehingga diharapkan dengan adanya variasi jarak antara pusat *returning blade* turbin angin dan pusat silinder pengganggu akan diketahui jarak (S/D) yang paling efektif mengurangi gaya drag sehingga berpengaruh terhadap torsi, *Coefficient of Power (CoP)*, dan putaran turbin yang dihasilkan.

### 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh dari silinder sirkular sebagai pengganggu aliran pada sisi *returning blade* dan mengetahui pengaruh variasi jarak antara pusat *returning blade* turbin angin dan pusat silinder pengganggu (S/D) serta variasi nilai *Reynold number* terhadap peningkatan performa turbin angin *Savonius*. Oleh karena itu, diperlukan analisis data sebagai berikut :

1. Putaran turbin
2. Torsi statis turbin (pada saat turbin diam)
3. *Coefficient of Power (CoP)*

### 1.4 Batasan Masalah

Pada penelitian ini digunakan beberapa batasan masalah, adapun batasan masalah yang digunakan adalah sebagai berikut :

1. Fluida yang mengalir adalah udara dalam kondisi aliran *steady* dan *uniform*, dengan bilangan *Reynolds*  $Re = 60000, 75000, \text{ dan } 90000$
2. Analisa dilakukan pada turbin angin tipe *Savonius* dengan diameter (D) = 60 mm dan pengganggu berupa silinder sirkular dengan diameter (d) = 12 mm.

3. Variasi jarak pusat *returning blade* turbin angin dengan pusat silinder pengganggu ( $S/D$ ) yang digunakan sebesar  $1,2 \leq S/D \leq 2,1$ .
4. Aliran fluida yang digunakan untuk memutar turbin merupakan aliran satu arah.
5. Kemungkinan terjadinya perpindahan panas dapat diabaikan.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

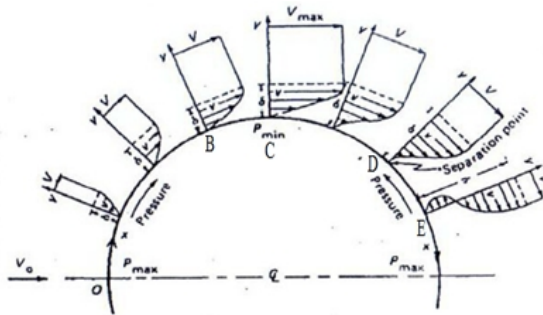
#### **2.1 Aliran Laminar dan Turbulen**

Aliran laminar dan turbulen dibedakan berdasarkan karakteristik internal aliran. Umumnya klasifikasi ini bergantung pada gangguan-gangguan yang dapat dialami suatu aliran yang mempengaruhi gerak partikel-partikel fluida tersebut. Apabila aliran mempunyai kecepatan relatif rendah atau fluidanya sangat *viscous*, gangguan yang mungkin dialami medan aliran akibat getaran, ketidakteraturan permukaan batas dan sebagainya, relatif lebih cepat teredam oleh viskositas fluida dan aliran fluida tersebut disebut dengan aliran laminar. Saat gangguan yang timbul semakin besar hingga mencapai kondisi peralihan (*transition state*) pada kecepatan aliran yang bertambah besar atau efek viskositas yang mulai berkurang. Terlampauinya kondisi peralihan menyebabkan sebagian gangguan tersebut menjadi semakin kuat, dimana partikel bergerak fluktuatif atau acak dan terjadi percampuran gerak partikel antara lapisan-lapisan yang berbatas atau disebut dengan aliran turbulen.

Perbedaan mendasar antara aliran laminar dan turbulen adalah gerak olakan atau ketidakteraturan pada aliran turbulen jauh lebih efektif dalam pengangkutan massa serta momentum fluida dibandingkan gerak molekuler. Kondisi aliran laminar dan turbulen dapat dinyatakan dengan bilangan *Reynolds*.

#### **2.2 Aliran Melintasi Sebuah Silinder Sirkular**

Suatu aliran yang melintasi silinder sirkular akan menjadi aliran yang senantiasa berubah seiring dengan berubahnya bilangan *Reynolds*. Gaya drag pada aliran yang melintasi silinder sirkular dihasilkan karena adanya efek *viscous*. Gaya hambat yang timbul akibat perbedaan tekanan pada arah normal terhadap permukaan tersebut disebut *pressure drag* dan apabila pada arah tangensial terhadap permukaan disebut *skin friction drag*.



**Gambar 2.1** Mekanisme terjadinya separasi pada aliran melewati silinder (Fox and Mc Donald, 1994)

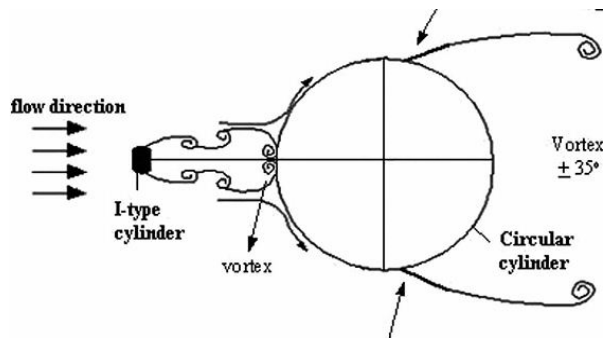
Gambar 2.1 diatas menjelaskan tentang proses terjadinya separasi dan *wake* baik pada *streamline* maupun profil kecepatan pada aliran yang melewati silinder. Fluida dari titik A sampai C mengalami percepatan tetapi gradien tekanannya negatif [ $\frac{\delta P}{\delta} < 0$ ]. Setelah melewati titik C, fluida mengalami peningkatan tekanan atau gradien tekanannya bernilai positif [ $\frac{\delta P}{\delta} > 0$ ] yang disebut *adverse pressure gradient* dan hal ini menyebabkan partikel fluida didalam *boundary layer* menjadi diperlambat. Gaya tekan dan gaya geser pada elemen bawah melawan arah aliran. Perbedaan tekanan dan gaya geser ini mengakibatkan momentum pada aliran yang diatasnya lebih besar dan sangat berpengaruh terhadap fluida yang terletak dekat dengan permukaan. Ketika momentum partikel fluida berkurang terus oleh gaya tekan dan gaya geser maka aliran fluida dipermukaan diperlambat hingga diam sampai pada titik D, gradient kecepatan menjadi nol [ $\frac{\delta U}{\delta y} \Big|_{y=0} = 0$ ]. Secara umum, pengaruh *adverse pressure gradient* adalah bersamaan dengan pengurangan kecepatan.

Lebih jauh lagi yaitu di titik E terjadi *adverse pressure gradient* yang cukup sehingga aliran didekat permukaan telah benar-benar berbalik dan fluida sudah tidak mampu mengikuti kontur dari permukaan dan menjauhinya. Titik dimana terjadi

peristiwa pemisahan aliran dari permukaan kontur  $\left[ \frac{\partial U}{\partial y} \right]_{y=0} = 0$  ] disebut dengan titik separasi. Hal ini terjadi karena momentum aliran yang digunakan untuk menggerakkan fluida sudah tidak mampu lagi mengatasi gaya gesek dan tekanan balik ( *adverse pressure* ).

Bilangan *Reynolds* juga mempunyai pengaruh yang besar sebagai penyebab terjadinya separasi. Semakin besar bilangan Reynolds maka momentum yang dimiliki fluida juga semakin besar dan aliran semakin cepat menjadi turbulen sehingga terjadinya titik separasi bisa tertunda. Parameter lain yang mempengaruhi separasi diantaranya kekasaran permukaan dan stabilitas *freestream*.

Jika separasi terjadi, maka akan terbentuk daerah di belakang silinder yang tidak tersentuh oleh aliran yang dinamakan *wake*. Daerah *wake* adalah daerah bertekanan rendah yang dibentuk oleh terpisahnya *boundary layer* bagian atas dan bagian bawah. Lebar dari *wake* sangat tergantung pada posisi titik separasi. Pada aliran yang turbulen, *boundary layer* lebih mampu untuk bertahan terhadap *adverse pressure gradient* dan gaya gesek, sehingga titik separasi terletak lebih ke belakang *body* maka daerah *wake* yang terbentuk lebih sempit.



**Gambar 2.2** Mekanisme terjadinya separasi pada aliran melewati silinder berpengganggu (Triyogi et al, 2009)

Gambar 2.2 di atas menunjukkan proses terjadinya separasi dan *wake* pada *streamline* suatu silinder berpengganggu tipe-I dengan sudut iris  $\theta_s = 65^\circ$ . Secara umum dapat dikatakan, bahwa *streamline* aliran simetri antara sisi bawah dan sisi atas dari silinder utama, dan pemasangan silinder tipe-I pengontrol di depan silinder utama menyebabkan silinder utama kehilangan titik stagnasi akibat tertutup oleh silinder pengontrol. Pada posisi sudut tertentu, diduga menunjukkan adanya *reattachment* dari *shear layer* yang terseparasi dari silinder pengontrol. Selanjutnya pada posisi *reattachment* tersebut, aliran terpisah menjadi dua *shear layer*. Satu *shear layer* akan bergerak ke belakang (*backward shear layer*), dan akan terseparasi pada sudut tertentu di bagian belakang silinder utama (*backward separation point*). Posisi separasi ini lebih mundur dibanding bila silinder utama tanpa dipengaruhi silinder teriris pengontrol. Sedangkan *shear layer* yang lain akan mengalir menuju ke depan (*forward shear layer*) dan juga akan terseparasi, membentuk *vortex* atau yang oleh **Tsutsui dan Igarahi** (2002) disebut sebagai *quasi-static vortex*.

### 2.3 Turbin Angin

Turbin angin adalah sebuah sistem yang berfungsi untuk mengubah energi kinetik angin menjadi energi mekanik pada poros turbin tersebut (Sargolzaei, 2007:51). Energi mekanik dari putaran poros turbin dapat digunakan untuk memutar generator listrik sehingga dapat menghasilkan energi listrik. Turbin angin dibedakan menjadi dua berdasarkan posisi porosnya, yaitu *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) dan *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT).

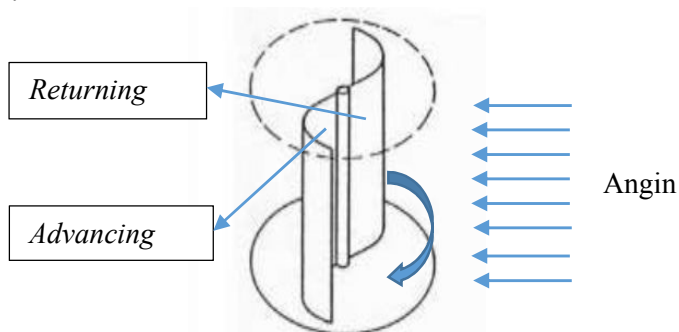
*Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) merupakan turbin angin dengan poros turbin yang tegak lurus dengan arah aliran angin. Turbin jenis ini sangat berguna untuk ditempatkan di daerah yang arah anginnya bervariasi karena turbin jenis ini tidak harus diarahkan searah dengan datangnya aliran angin. Pada saat ini terdapat tiga jenis *Vertical Axis Wind Turbine* diantaranya yaitu *Savonius*, *Darius*, dan H.



*Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT) merupakan turbin angin dengan poros turbin yang sejajar dengan arah aliran angin. Blade yang digunakan pada HAWT biasanya berbentuk airfoil yang memanfaatkan gaya angkat aliran angin untuk memutar poros turbin. Jenis turbin ini cocok untuk digunakan di daerah dengan kecepatan aliran angin sedang sampai tinggi. Turbin jenis HAWT memiliki efisiensi yang lebih besar daripada jenis VAWT.

## 2.4 Turbin Angin Savonius

Turbin angin tipe *Savonius* merupakan turbin dengan konstruksi sederhana pertama kali ditemukan oleh sarjana Finlandia bernama Sigurd J. Savonius. Turbin yang termasuk dalam kategori VAWT ini memiliki rotor dengan bentuk dasar setengah silinder. Konsep turbin angin *Savonius* cukup sederhana, prinsip kerjanya berdasarkan *differential drag windmill*. Pada turbin *Savonius* terdapat dua jenis blade yaitu *advancing blade* dan *returning blade*. Pada gambar 2.3 dapat dilihat bentuk turbin tipe *Savonius* beserta penamaan sudunya. Perbedaan besarnya nilai gaya drag yang diterima oleh masing – masing blade menyebabkan adanya torsi yang akan memutar turbin *Savonius*. Sehingga semakin besar perbedaan gaya drag antara *advancing blade* dan *returning blade* maka torsi yang dihasilkan juga akan semakin besar.



**Gambar 2.3** Penamaan bagian turbin angin *Savonius* (Sumber: [www.reuk.co.uk/Savonius-Wind-Turbines.htm](http://www.reuk.co.uk/Savonius-Wind-Turbines.htm))

## 2.5 Perhitungan Power Turbin dan Coefficient of Performance (CoP)

Turbin angin *Savonius* dapat berputar karena menerima gaya drag dari angin. Angin memiliki energi yang dinamakan energi kinetik. Besarnya energi kinetik yang dimiliki oleh angin bergantung pada dua faktor, yaitu massa dan kecepatan. Hubungan antara massa dan kecepatan dapat dilihat pada persamaan (2.1) dibawah ini

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot U^2 \quad (2.1)$$

Apabila luas permukaan pada turbin yang ditabrak oleh angin dirumuskan dengan persamaan

$$A = 2 \cdot D \cdot H \quad (2.2)$$

dan volume angin yang mengalir per second dapat dituliskan seperti persamaan:

$$Q = A \cdot U \quad (2.3)$$

Maka, laju alir massa angin per satuan waktu dapat dituliskan dengan persamaan (2.4) dibawah ini.

$$\dot{m} = \rho \cdot Q \quad (2.4)$$

dimana:

$E_k$  : energi kinetik (Joule)

$\dot{m}$  : laju alir massa angin (kg/s)

$U$  : kecepatan angin (m/s)

$\rho$  : densitas udara (kg/m<sup>3</sup>)

$Q$  : debit angin (m<sup>3</sup>/s)

$A$  : cross sectional area (m<sup>2</sup>)

$D$  : diameter sudu turbin (m)

$H$  : tinggi turbin (m)

Sehingga didapatkan persamaan power pada angin adalah sebagai berikut:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot U \times U^2 \quad (2.5)$$

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot U^3 \quad (2.6)$$

Sebuah sistem pasti memiliki kerugian – kerugian yang mengurangi besarnya energi input, sehingga efisiensi dari sistem

tersebut tidak mungkin mencapai 1 . Untuk menunjukkan power yang hanya dapat dimanfaatkan untuk turbin, maka ditambahkan sebuah koefisien dalam persamaan (2.6) diatas. Koefisien ini memiliki nilai kurang dari 1 dan biasa disebut *Coefficient of Power* (CoP).

$$P = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot A \cdot U^3 \quad (2.7)$$

Sedangkan power yang keluar dari turbin dapat dihitung berdasarkan voltage dan arus yang dihasilkan oleh generator turbin. Hubungan antara voltage dan arus dapat dituliskan pada persamaan (2.8) dibawah ini:

$$P = V \cdot I \quad (2.8)$$

dimana:

P : daya pada turbin (watt)

V : tegangan yang dihasilkan dari generator (volt)

I : kuat arus yang dihasilkan dari generator (ampere)

sehingga, coefficient of power (CoP) dapat ditulis:

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot U^3} = \frac{V \cdot I}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot U^3} \quad (2.9)$$

## 2.6 Koefisien Drag

Koefisien drag merupakan suatu bilangan tak berdimensi yang digunakan untuk menunjukkan gaya drag suatu aliran fluida melintasi benda. Sedangkan gaya *drag* yang terjadi dapat berupa *skin friction drag* (FDf) yaitu gaya hambat yang menyinggung permukaan secara tangensial yang timbul akibat adanya viskositas (tegangan geser antara fluida dan permukaan benda), dan *pressure drag* (FDp) yaitu gaya hambat yang tegak lurus terhadap permukaan benda yang timbul karena adanya tekanan fluida. Resultan antara *friction drag* dan *pressure drag* ini disebut sebagai *total drag*. Pada dasarnya gaya *drag* dari aliran fluida yang melintasi suatu benda bergantung pada beberapa hal yaitu luasan benda yang menerima gaya, kecepatan aliran, viskositas dan

densitas fluida. Adapun jika dalam persamaan, nilai koefisien *drag* adalah:

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho \cdot U_{\infty}^2 \cdot A} \quad (2.10)$$

dimana :

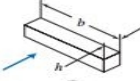






$F_D$  = Gaya *Drag*

$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_{\infty}^2$  = Tekanan dinamis aliran bebas

$A$  = Luas permukaan benda

Turbin Savonius memiliki dua blade yang berbentuk seperti huruf S. Besar nilai koefisien drag yang dimiliki oleh sisi *advancing blade* lebih besar daripada koefisien drag yang dimiliki sisi *returning blade*. Hal ini seperti yang dijelaskan oleh (Hoerner, S.F., Fluid-Dynamic Drag) pada tabel 2.1. Advancing blade turbin yang digunakan serupa dengan benda C-section (open side facing flow) dan returning blade turbin serupa dengan C-section (open side facing downstream).

**Tabel 2.1** Koefisien drag untuk berbagai bentuk benda pada  $Re \geq 1000$  (Hoerner, S. F., Fluid-Dynamics of Drag, 2<sup>nd</sup> ed. 1965)

Object	Diagram	$C_D(Re \geq 10^3)$
Square prism		$b/h = \infty$ 2.05 $b/h = 1$ 1.05
Disk		1.17
Ring		1.20 <sup>b</sup>
Hemisphere (open end facing flow)		1.42
Hemisphere (open end facing downstream)		0.38
C-section (open side facing flow)		2.30
C-section (open side facing downstream)		1.20

## 2.7 Bilangan *Reynolds*

Kondisi aliran laminar atau turbulen dapat dinyatakan dengan bilangan *Reynolds* untuk aliran *incompressible*. Bilangan *Reynolds* adalah suatu bilangan tak berdimensi yang merupakan perbandingan antara gaya inersia bodi terhadap gaya geser yang ditimbulkan aliran fluida.

$$Re = \frac{G}{G} \frac{i_r}{g} \quad (2.11)$$

dimana, Gaya inersia =  $p \times A = \rho \cdot U_{\infty}^2 \cdot L^2$

$$\text{Gaya geser} = \tau \times A = \left( \frac{\mu \cdot U_{\infty}}{L} \right) \cdot L^2$$

sehingga, 
$$R = \frac{\rho \cdot U_{\infty}^2 \cdot L^2}{\left( \frac{\mu \cdot U_{\infty}}{L} \right) \cdot L^2} = \frac{\rho \cdot U_{\infty} \cdot L}{\mu} \quad (2.12)$$

dimana,

$\rho$  : densitas fluida ( $\text{kg/m}^3$ )

$U_{\infty}$  : kecepatan aliran *free stream* fluida ( $\text{m/s}$ )

$\mu$  : viskositas dinamis fluida ( $\text{N.s/m}^2$ )

$L$  : panjang karakteristik ( $\text{m}$ )

Sedangkan pada penelitian ini panjang karakteristik ( $L$ ) yang digunakan adalah :  $2D-b$

dimana,

$D$  : diameter turbin ( $\text{m}$ )

$B$  : diameter *overlap* ( $\text{m}$ )

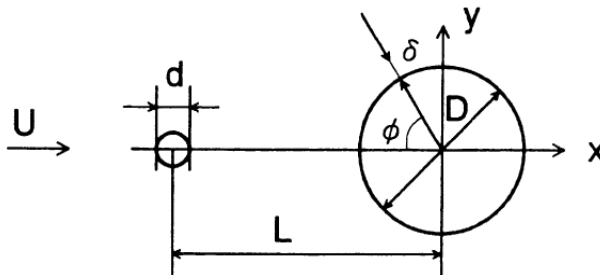
sehingga,

$$R = \frac{\rho \cdot U_{\infty} \cdot (2D-b)}{\mu} \quad (2.13)$$

## 2.8 Penelitian Terdahulu

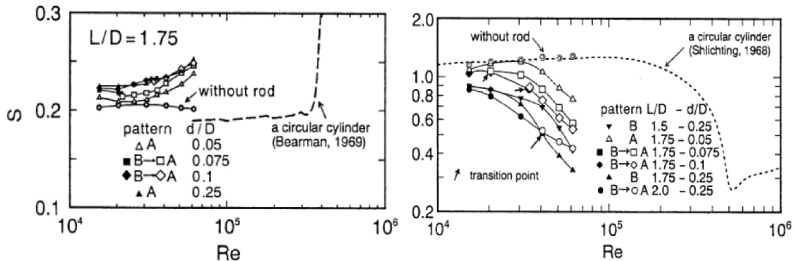
### 2.8.1 Penelitian Silinder dengan Pengganggu

Penelitian tentang aliran fluida pada sebuah silinder yang diberi pengganggu berupa silinder lain pernah dilakukan oleh **Tsutsui dan Igarashi (2002)**. Penelitian tersebut memvariasikan jarak antara kedua pusat silinder ( $L/D$ ), diameter silinder pengganggu ( $d/D$ ), dan harga bilangan Reynolds pada rentang  $1,5 \times 10^4 \leq Re \leq 6,2 \times 10^4$ . Gambar 2.4 merupakan gambar dari geometri benda uji.

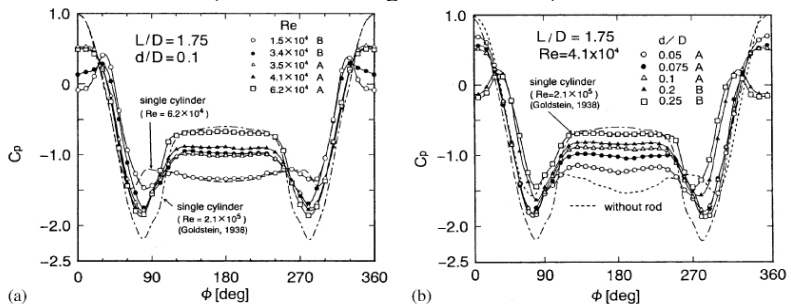


**Gambar 2.4** Geometri benda uji ( **Tsutsui dan Igarashi, 2002** )

Geometri benda uji tersebut mempunyai diameter silinder utama sebesar 40 mm dengan perubahan diameter silinder pengganggu dari 1 mm sampai 10 mm sedangkan jarak antar kedua pusat silinder divariasikan dari rentang 50 mm sampai 120 mm. Dari hasil penelitian tersebut didapatkan bahwa penurunan harga koefisien *drag* ( $C_D$ ) dan peningkatan bilangan Strouhal yang disebabkan oleh peningkatan bilangan Reynolds ( $Re$ ) dan peningkatan  $d/D$  serta penurunan harga  $L/D$ . Dengan peningkatan bilangan Reynolds di atas  $3 \times 10^4$ , maka titik separasi akan bergeser semakin cepat, tebal *Shear Layer* berkurang, sehingga bilangan Strouhal akan meningkat dan daerah *wake* menyempit (koefisien *drag* menurun). Gambar 2.5 merupakan grafik hubungan bilangan Strouhal dengan bilangan Reynolds yang dilakukan pada penelitian ini.



**Gambar 2.5** Grafik bilangan Strouhal dan koefisien drag (Tsutsui dan Igarashi, 2002)



**(a) Dengan variasi Re**

**(b) Dengan variasi d/D**

**Gambar 2.6** Grafik distribusi tekanan pada silinder sirkuler utama (Tsutsui dan Igarashi, 2002)

Untuk mengetahui pengaruh variasi bilangan Reynolds ( $Re$ ), diameter silinder pengganggu ( $d/D$ ), dan jarak pusat silinder pengganggu dengan silinder sirkuler utama ( $L/D$ ) terhadap koefisien drag ( $C_D$ ) maka didapatkan grafik distribusi  $C_p$  seperti gambar 2.6 diatas. Pada gambar 2.6 (a) percobaan dilakukan dengan variasi bilangan Reynolds yang dilakukan pada  $L/D = 1,75$  dan  $d/D = 0,1$  dengan dua pola aliran yaitu pola aliran A dengan adanya *vortex shedding* dibelakang silinder pengganggu dan pola aliran B yaitu tanpa *vortex shedding* dibelakang silinder pengganggu. Pada grafik tersebut dapat dilihat bahwa dengan penambahan silinder pengganggu maka  $C_p$  pada bagian depan silinder sirkuler utama mengalami penurunan. Untuk pola aliran

(A)  $C_p$  menurun menjadi 0,5 dan pola aliran (B)  $C_p$  menjadi negatif pada bagian depan silinder sirkular utama. Dari grafik 2.6 (a) dapat disimpulkan bahwa dengan penambahan silinder pengganggu dengan variasi bilangan Reynolds yang semakin meningkat maka lebar *wake* dibelakang silinder sirkular utama semakin menyempit.

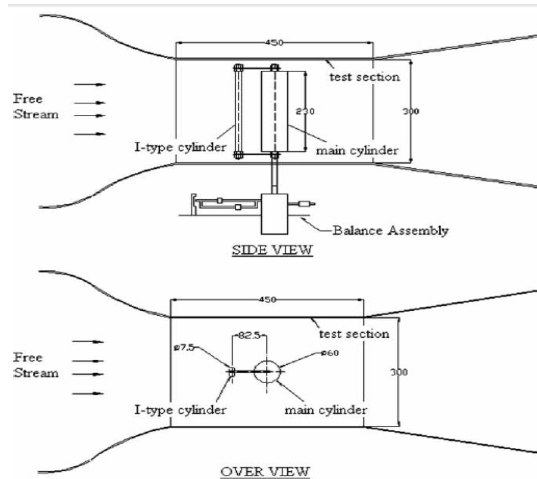
Sedangkan pada gambar 2.6 (b) percobaan dilakukan dengan variasi diameter silinder sirkular utama yang dilakukan pada  $L/D = 1,75$  dan  $Re = 4,1 \times 10^4$ . Pada grafik tersebut dapat dilihat bahwa dengan memvariasikan diameter silinder pengganggu yang semakin meningkat maka  $C_p$  pada bagian depan silinder sirkular utama mengalami penurunan. Dari grafik 2.6 (b) dapat disimpulkan bahwa dengan penambahan silinder pengganggu dengan variasi diameter yang semakin meningkat maka lebar *wake* dibelakang silinder sirkular utama semakin menyempit.

Pada penelitian **Triyogi et al (2009)** dengan menggunakan sebuah bodi pengganggu berupa silinder sirkular tipe I yang diposisikan di depan silinder sirkular utama seperti pada gambar 2.7. Silinder utama yang digunakan berdiameter  $d = 60$  mm sedangkan silinder pengganggu berdiameter  $d_s = 7,5$  mm atau  $d_s/D = 0,125$ . Penelitian ini menggunakan variasi pada sudut potong silinder pengganggu ( $\theta$ ) =  $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 53^\circ$ , dan  $65^\circ$  dan bilangan Reynolds sebesar  $5,3 \times 10^4$ . Jarak antara pusat silinder pengganggu dan silinder utama diposisikan tetap yaitu sebesar  $S/D = 1,375$ .

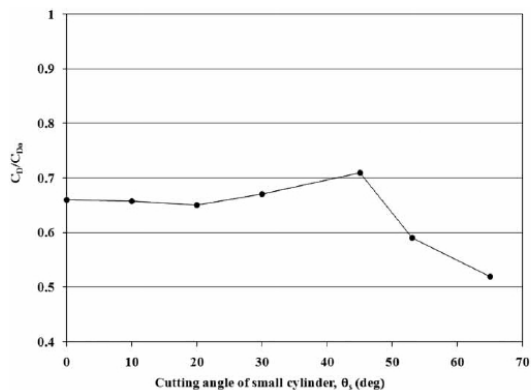
Gambar 2.8 menunjukkan hasil  $C_D/C_{D0}$  yaitu perbandingan koefisien *drag* yang muncul dari silinder utama yang diberikan pengganggu dengan silinder utama tunggal. Dari grafik tersebut  $C_D/C_{D0}$  dibandingkan dengan sudut iris silinder pengganggu dari rentang  $0^\circ$  sampai  $65^\circ$  didapatkan bahwa pada sudut  $65^\circ$  memiliki nilai  $C_D/C_{D0}$  terkecil yaitu mencapai 0,52. Hal itu membuktikan bahwa adanya benda pengganggu berupa silinder teriris tipe I mampu memperkecil gaya *drag* yang muncul pada silinder utama



sampai 48% dibandingkan dengan tidak menggunakan penghalang.

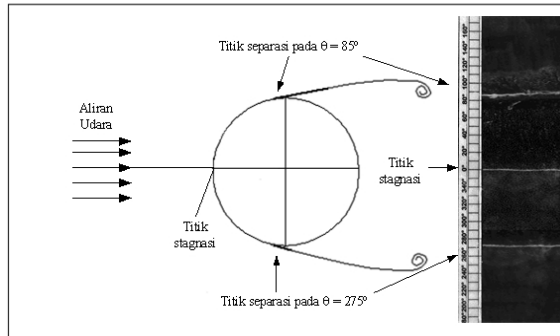


**Gambar 2.7** Skema alat silinder pengganggu Tipe I yang disusun tandem dengan silinder utama (Triyogi et al, 2009)



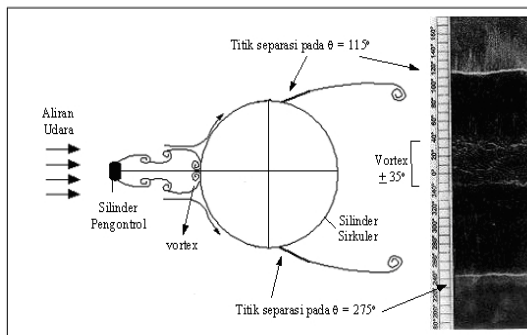
**Gambar 2.8** Grafik  $C_D/C_{D0}$  terhadap sudut iris silinder pengganggu (Triyogi et al, 2009)

Pada penelitian ini didapatkan visualisasi aliran pada dinding silinder utama dengan metode *oil flow picture*, dimana hasil foto dari goresan aliran pada dinding silinder sebagai berikut:



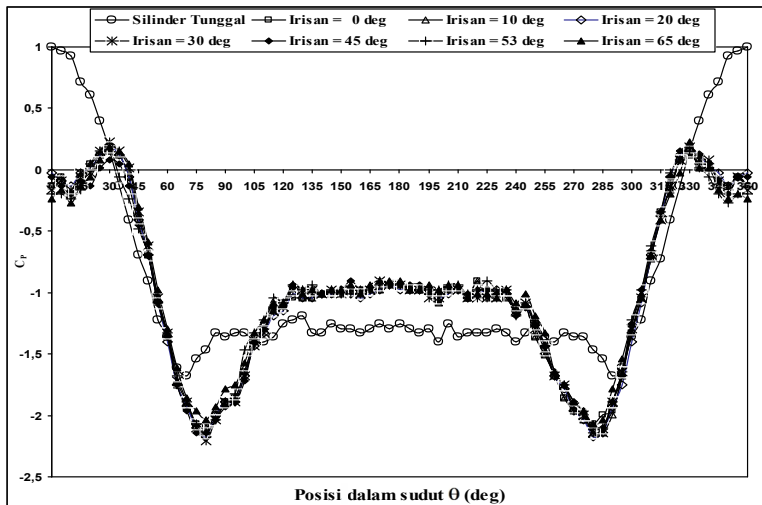
**Gambar 2.9** Visualisasi aliran pada silinder utama (Triyogi, 2009)

Pada Gambar 2.9 terlihat bahwa pada silinder tunggal titik stagnasi terletak pada posisi  $\theta = 0^\circ$ , sedangkan letak titik separasinya pada  $\theta = 85^\circ$  pada sisi atas dan  $\theta = 275^\circ$  pada sisi bawah. Hasil ini menunjukkan bahwa *streamline* melintasi silinder sirkuler tunggal adalah simetri sehingga *wake* yang dihasilkan juga simetri.



**Gambar 2.10** Visualisasi aliran pada silinder berpengganggu tipe I (Triyogi, 2009)

Bila di depan silinder sirkuler dipasang sebuah silinder teriris pengontrol tipe-I dengan sudut iris  $\theta_s = 65^\circ$ , seperti terlihat pada Gambar 2.10 terjadi perubahan karakteristik aliran dibanding bila silinder sirkuler tunggal tanpa silinder pengontrol. Secara umum dapat dikatakan, bahwa *streamline* aliran simetri antara sisi bawah dan sisi atas dari silinder utama, dan pemasangan silinder pengontrol di depan silinder utama menyebabkan silinder utama kehilangan titik stagnasi akibat tertutup oleh silinder pengontrol.

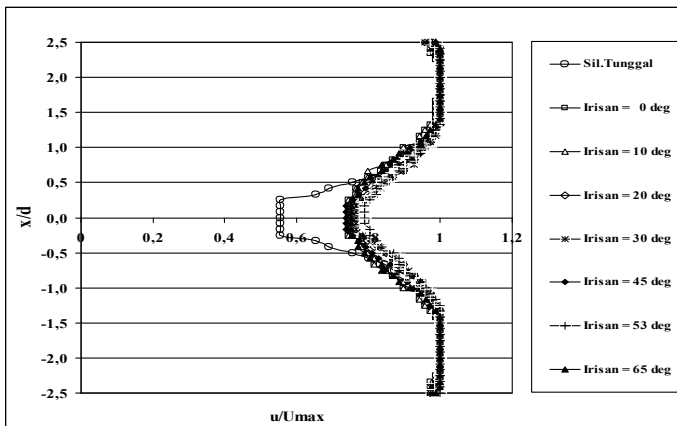


**Gambar 2.11** Distribusi tekanan ( $C_p$ ) pada aliran melalui silinder berpengganggu tipe I pada berbagai sudut potong (Triyogi, 2009)

Pada Gambar 2.11 di atas terlihat pada grafik koefisien *pressure* ( $C_p$ ) sekitar posisi  $\theta = 30^\circ$  dan  $330^\circ$ , diduga menunjukkan adanya *reattachment* dari *shear layer* yang terseparasi dari silinder pengontrol. Selanjutnya pada posisi *reattachment* tersebut, aliran terpisah menjadi dua *shear layer*. Satu *shear layer* akan bergerak ke belakang (*backward shear layer*), dan akan terseparasi pada posisi sekitar  $\theta = 115^\circ$  dan  $245^\circ$  di bagian

belakang silinder utama (*backward separation point*). Posisi separasi ini lebih mundur dibanding bila silinder utama tanpa dipengaruhi silinder teriris pengontrol. Sedangkan *shear layer* yang lain akan mengalir menuju ke depan (*forward shear layer*) dan juga akan akan terseparasi, membentuk *vortex* atau yang oleh Tsutsui dkk. (2002) disebut sebagai *quasi-static vortex*. Fenomena ini juga diamati pada hasil pengukuran  $C_p$  secara langsung, seperti telah didiskusikan diatas.

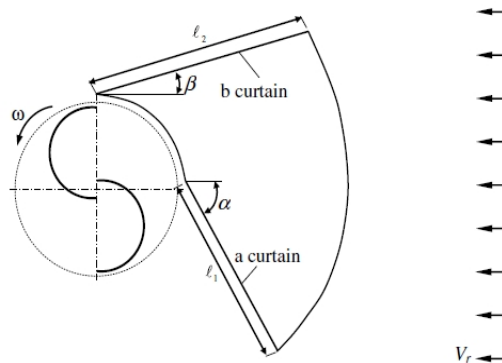
Hasil pengukuran koefisien *drag* didapatkan bahwa pengurangan sudut iris yang efektif adalah ketika diberi silinder pengganggu tipe-I dengan sudut iris  $65^\circ$ . Hal ini dikarenakan daerah *wake* yang terjadi dibelakang silinder tipe-I  $65^\circ$  sebagai silinder pengganggu sangat besar sehingga efektif mengganggu silinder utama dan mampu menunda letak titik separasi dan akhirnya akan menghasilkan daerah *wake* yang kecil dan mereduksi gaya *drag* yang terjadi pada silinder utama. Besarnya pengurangan gaya *drag* yang dihasilkan mencapai 52% dibandingkan dengan gaya *drag* silinder tunggal yang dapat dilihat pada Gambar 2.12 di bawah ini.



**Gambar 2.12** Profil kecepatan pada aliran melalui silinder berpengganggu tipe I pada berbagai sudut potong (Triyogi, 2009)

### 2.8.2 Penelitian tentang Peningkatan Peforma dari Turbin Savonius

Penelitian mengenai aliran fluida yang melalui turbin angin tipe Savonius yang diberi pengganggu berupa dua buah plat yang diposisikan di depan turbin seperti pada gambar 2.13, dilakukan oleh **B.D. Altan et al (2008)** dengan memvariasikan panjang plat ( $\ell_1$  dan  $\ell_2$ ) dan besar sudut plat ( $\alpha$  dan  $\beta$ ) dengan kecepatan angin 7 m/s serta bilangan Reynolds  $1,5 \times 10^5$ .

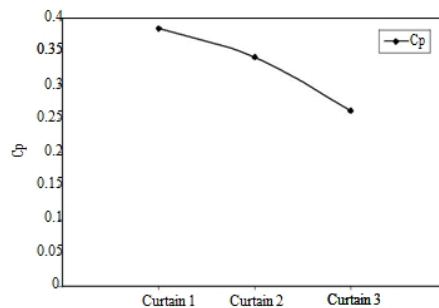


**Gambar 2.13** Skema susunan pengganggu pada turbin angin Savonius (**B.D. Altan et al, 2008**)

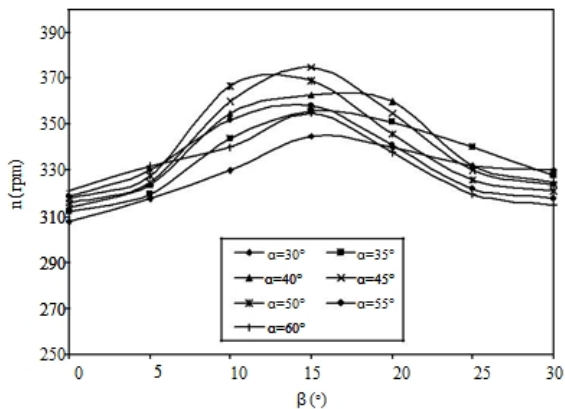
Dari Tabel 2.2 dapat dilihat konfigurasi panjang plat penghalang yang digunakan dalam penelitian. Sedangkan pada gambar 2.14 dapat diketahui bahwa besarnya nilai *Coefficient of Power* ( $C_p$ ) yang dihasilkan selalu menurun. Pada gambar 2.15 dapat diketahui hasil putaran turbin akibat pengaruh besarnya sudut plat penghalang. Hasil penelitian didapatkan bahwa *Coefficient of Power* ( $C_p$ ) dari turbin angin Savonius dapat meningkat hingga 38,5% apabila diberi pengganggu dengan susunan yang optimal, yaitu dengan panjang plat pengganggu  $\ell_1$  sebesar 45cm dan  $\ell_2$  sebesar 52 cm dengan sudut sudu pengganggu  $\alpha = 45^\circ$  dan  $\beta = 15^\circ$ .

**Tabel 2.2** Konfigurasi panjang plat penghalang (B.D. Altan et al, 2008)

Type of curtain arrangement	Distance $\ell_1$ (cm)	Distance $\ell_2$ (cm)
Curtain 1	45	52
Curtain 2	34	39
Curtain 3	22	26

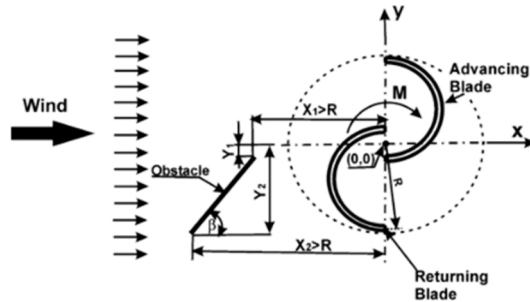


**Gambar 2.14** Grafik pengaruh panjang pengganggu terhadap *Coefficient of Power* (B.D. Altan et al, 2008)



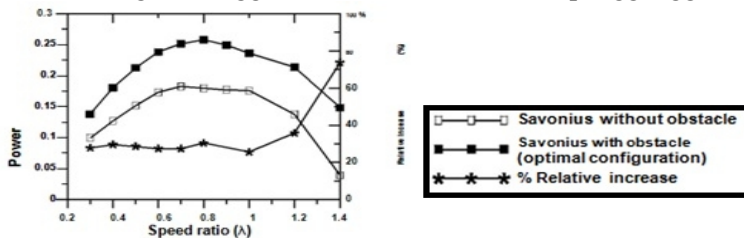
**Gambar 2.15** Grafik pengaruh besar sudut plat ( $\alpha$  dan  $\beta$ ) pada pengganggu 1 terhadap putaran turbin (B.D. Altan et al, 2008)

Simulasi dengan software CFD pada turbin angin Savonius yang diberi pengganggu berupa plat yang diposisikan didepan turbin dengan variasi besar sudut plat ( $\beta$ ) dan speed ratio ( $\lambda$ ) dengan kecepatan angin 10 m/s juga telah dilakukan oleh **M.H. Mohamed et al (2010)**. Skema rangkaian dapat dilihat pada gambar 2.16.



**Gambar 2.16** Skema susunan pengganggu pada turbin angin tipe Savonius dengan dua sudu dan tiga sudu (**M.H. Mohamed et al, 2010**)

Pada gambar 2.17 dibawah ini dapat diketahui besarnya nilai power yang dihasilkan oleh turbin akibat dari adanya beberapa variasi yang diberikan. Hasil simulasi didapatkan bahwa *Coefficient of Power* ( $C_p$ ) dari turbin angin Savonius dapat meningkat hingga 27,3% pada *speed ratio* 0,7 dan besar sudut  $\beta = 100,83^\circ$  dengan menggunakan dua buah sudu berpengganggu.



**Gambar 2.17** Grafik hubungan antara *speed ratio* dan *power coefficient* ( $C_p$ ) pada turbin angin Savonius dengan dua sudu (**M.H. Mohamed et al, 2010**)

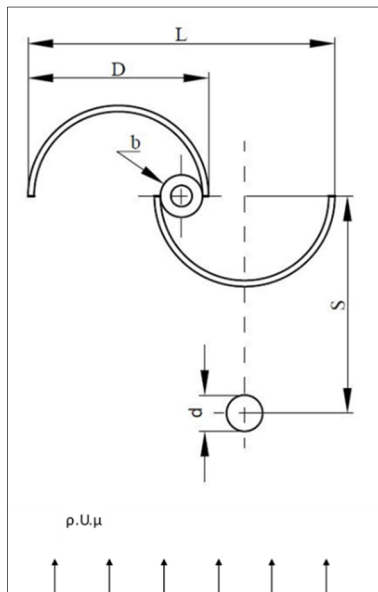
*{Halaman ini sengaja dikosongkan.}*



## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Parameter yang Diukur

Skema penelitian dan parameter yang akan dianalisa pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.1:



**Gambar 3.1** Skema Penelitian (*top view*)

1.  $\rho$  : densitas udara ( $\text{kg/m}^3$ )
2.  $\mu$  : viskositas udara ( $\text{N.s/m}^2$ )
3.  $U$  : kecepatan udara ( $\text{m/s}$ )
4.  $d$  : diameter silinder pengganggu ( m )
5.  $D$  : diameter turbin ( m )
6.  $S$  : jarak antara pusat silinder pengganggu dengan pusat *returning blade* (m)
7.  $b$  : diameter overlap (m)
8.  $L$  : panjang karakteristik (m)

### 3.2 Analisa Dimensi

Pada penelitian ini dibutuhkan analisa dimensi untuk menentukan variabel apa saja yang mempengaruhi peforma turbin savonius yang disebabkan oleh pemberian pengganggu berupa silinder sirkular.

### 3.2.1 Analisa Dimensi untuk *Coefficient of Power*

Langkah-langkah analisa dimensi yaitu sebagai berikut :

1. Menentukan parameter - parameter yang mempengaruhi *power*

$$P = f(\rho, \mu, U, D, d, S, H, t, b, n)$$

Jumlah parameter (n) = 11 parameter

Parameter-parameter tersebut adalah :

P = Power, N.m/s

$\rho$  = densitas udara,  $\text{kg/m}^3$

$$\mu = \text{viskositas absolut udara, N.s/m}^2$$

$U$  = kecepatan aliran udara, m/s

D = diameter turbin angin, m

$d$  = diameter silinder pengganggu, m

$S$  = jarak antara pusat *returning blade* turbin dengan silinder pengganggu, m

$$H = \text{tinggi turbin, m}$$

$t$  = panjang silinder penggangu, m

$$b = \text{diameter overlap, m}$$
$$n = \text{putaran sudu turbin, rpm}$$

- Menentukan satu grup dimensi primer yang digunakan dalam menganalisa

Dipilih  $M, L, t$ .

3. Membuat dimensi primer dari parameter-parameter yang dipilih

Parameter	P	$\rho$	$\mu$	U	D	d	S	H	t	b	n
Dimensi	$\frac{\text{M L}^2}{\text{t}^3}$	$\frac{\text{M}}{\text{L}^3}$	$\frac{\text{M}}{\text{L t}}$	$\frac{\text{L}}{\text{t}}$	L	L	L	L	L	L	$\frac{1}{\text{t}}$

4. Memilih parameter berulang yang jumlahnya (m) sama dengan jumlah dimensi primer (r) yang digunakan yaitu :  $\rho, U, D$ .

Jumlah parameter berulang (m) = r = 3

5. Menentukan grup tanpa dimensi yang akan dihasilkan. Jumlah grup tanpa dimensi yang akan dihasilkan = n-m = 11 - 3 = 8 grup tanpa dimensi.

$$\text{i. } \pi_1 = \rho^a U^b D^c P = \left(\frac{M}{L^3}\right)^a \left(\frac{L}{t}\right)^b (L)^c \left(\frac{M L^2}{t^3}\right) = (M^0 L^0 t^0)$$

dimana :

$$M : a + 1 = 0$$

$$L : -3a + b + c + 2 = 0$$

$$t : -b - 3 = 0$$

diperoleh :

$$a = -1 ; b = -3 ; c = -2$$

sehingga :

$$\pi_1 = \rho^{-1} U^{-3} D^{-2} P$$

atau

$$\pi_1 = \frac{P}{\rho U^3 D^2}$$

- ii. Dengan cara yang sama diperoleh :

$$\pi_2 = \frac{\mu}{\rho U D}$$

$$\pi_3 = \frac{d}{D}$$

$$\pi_4 = \frac{S}{D}$$

$$\pi_5 = \frac{D}{t}$$

$$\pi_6 = \frac{b}{D}$$

$$\pi_7 = \frac{n D}{U}$$

$$\pi_8 = \frac{U}{D}$$

Dari analisa dimensi diatas diperoleh grup tak berdimensi sebagai berikut :

$\pi_1 = \text{Coefficient of Power}$

$\pi_2 = \text{bilangan Reynolds}$

$\pi_3 = \text{rasio diameter silinder pengganggu dengan diameter turbin angin}$

$\pi_4 = \text{rasio jarak antara pusat } \textit{returning blade} \text{ dan pusat silinder pengganggu dengan diameter turbin angin}$

$\pi_5 = \text{rasio tinggi turbin angin dengan diameter turbin angin}$

$\pi_6 = \text{rasio panjang silinder pengganggu dengan diameter turbin angin}$

$\pi_7 = \text{rasio diameter overlap dengan diameter turbin angin}$

$\pi_8 = \text{Tip Speed Ratio}$

Hubungan antara grup tak berdimensi sebagai berikut :

$$\pi_1 = f(\pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7, \pi_8)$$

$$\frac{P}{\rho U^3 D^2} = f_1\left(\frac{\mu}{\rho U D}, \frac{d}{D}, \frac{S}{D}, \frac{H}{D}, \frac{t}{D}, \frac{b}{D}, \frac{n D}{U}\right)$$

Pada penelitian ini,  $\frac{d}{D}, \frac{H}{D}, \frac{t}{D}, \frac{b}{D}$  sebagai variabel tetap, sedangkan  $\frac{S}{D}, \frac{\mu}{\rho U D}$ , dan  $\frac{n D}{U}$  divariasikan agar dapat mengetahui seberapa besar pengaruhnya terhadap *Coefficient of Power* pada turbin angin sehingga :

$$\frac{P}{\rho U^3 D^2} = f_2\left(\frac{S}{D}, \frac{\mu}{\rho U D}, \frac{n D}{U}\right)$$

Pada penelitian ini D sebanding dengan L, yaitu ( $L=2D-b$ ). Sehingga,

$$\frac{P}{\rho U^3 D^2} = f_3\left(\frac{S}{D}, \frac{\mu}{\rho U L}, \frac{n D}{U}\right)$$

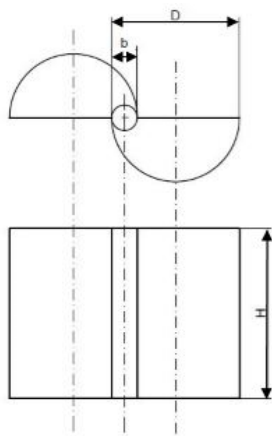
atau

$$C_o = f_4\left(\frac{S}{D}, R, T\right)$$

### 3.3 Metode eksperimen

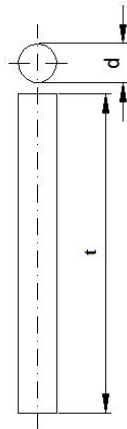
#### 3.3.1 Benda Uji

- a. Benda Uji turbin Savonius dapat dilihat pada gambar 3.2 dibawah. Profil turbin angin tipe Savonius adalah sebagai berikut :
- Diameter (D) : 60 mm
  - Tinggi (H) : 80 mm
  - Diameter overlap : 14 mm



**Gambar 3.2** Turbin Angin Savonius

- b. Profil Silinder Pengganggu dapat dilihat pada gambar 3.3, dan ukurannya adalah sebagai berikut :
- Diameter (d) : 12 mm
  - Panjang (t) : 280 mm
  - Jarak dari pusat *returning blade* turbin angin (S/D) : 1,2 ; 1,3 ; 1,4 ; 1,5 ; 1,6 ; 1,7 ; 1,8 ; 1,9 ; 2,0 ; 2,1



**Gambar 3.3** Sketsa benda pengganggu berupa silinder sirkular

### 3.3.2 *Wind Tunnel* (Terowongan Angin)

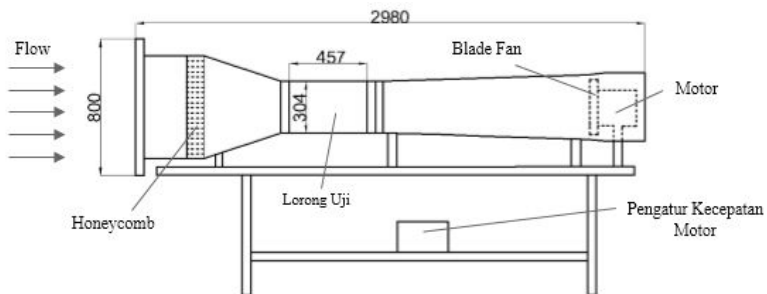
#### **Spesifikasi *Wind Tunnel***

Skema dari *Wind Tunnel* dapat dilihat pada gambar 3.4 di bawah ini.

Jenis *wind tunnel* : *subsonic, open circuit wind tunnel*

Bentuk saluran uji : penampang segi 8

- Panjang : 457 mm
- Tinggi : 304 mm
- Lebar : 304 mm



**Gambar 3.4** Skema *Wind Tunnel Sub Sonic*

### 3.3.3 Alat Ukur

Pada penelitian ini digunakan beberapa alat ukur untuk mendapatkan putaran turbin angin dan torsi yang dihasilkan.

#### a. Tachometer

Tachometer ini merupakan alat ukur digital yang berfungsi untuk mengukur kecepatan rotasi dari sebuah objek. Tachometer yang digunakan yaitu *Economical Non-Contact Pocket Optical Tachometer OMEGA seri HHT12* dengan akurasi pembacaan 0.01% atau  $\pm 1$  digit.



**Gambar 3.5** Tachometer OMEGA seri HHT12

#### b. Torque meter

Torque meter ini merupakan alat ukur digital yang berfungsi untuk mengukur torsi statis dari suatu poros. Torque meter yang digunakan yaitu **Torque meter LUTRON model : TQ-8800** dengan resolusi 0,1 Newton-cm.



**Gambar 3.6** Torque meter LUTRON model : TQ-8800

c. Pitot Static Tube

Alat ini berfungsi untuk mengukur besar tekanan statis dan tekanan stagnasi aliran fluida di tengah saluran uji yang kemudian dengan persamaan Bernoulli dapat dihitung harga tekanan dinamisnya untuk kemudian mengukur harga kecepatan aliran fluida.



**Gambar 3.7** Pitot Static Tube

d. Manometer

Alat ini berfungsi untuk menyatakan besar tekanan yang diukur dengan pitot static tube. Manometer yang digunakan memiliki kemiringan  $15^\circ$  untuk membaca  $\Delta h$  terukur. Fluida kerja yang digunakan dalam manometer ini yaitu *red oil* dengan *specific gravity* 0,8093.



**Gambar 3.8** Manometer



e. Multi Meter

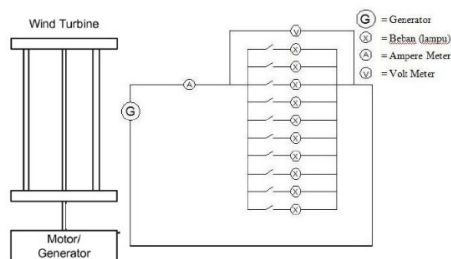
Multi meter merupakan alat ukur digital yang berfungsi untuk mengukur tegangan, hambatan, dan arus listrik. Multi meter yang digunakan pada penelitian ini yaitu **Masda Multimeter Digital CT-830B** dengan ketelitian 1%.



**Gambar 3.9** Masda Multimeter Digital CT-830B

### 3.4 Pengukuran Daya yang Dihasilkan Turbin

Dalam penelitian ini metode yang digunakan untuk pengukuran daya yang dihasilkan turbin yaitu menggunakan generator listrik. Dengan menghubungkan poros turbin *Savonius* dan generator listrik menggunakan *flexible coupling* akan didapatkan daya yang dihasilkan turbin dalam bentuk energi listrik. Agar dapat diukur maka diperlukan suatu rangkaian dengan pembebanan tertentu untuk mengukur arus listrik dan tegangan yang keluar dari generator. Pada gambar 3.10 ini merupakan skema rangkaian untuk mengukur arus dan tegangan yang dihasilkan.



**Gambar 3.10** Skema rangkaian untuk pengukuran daya turbin

### 3.5 Prosedur Penelitian

Prosedur yang dilakukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

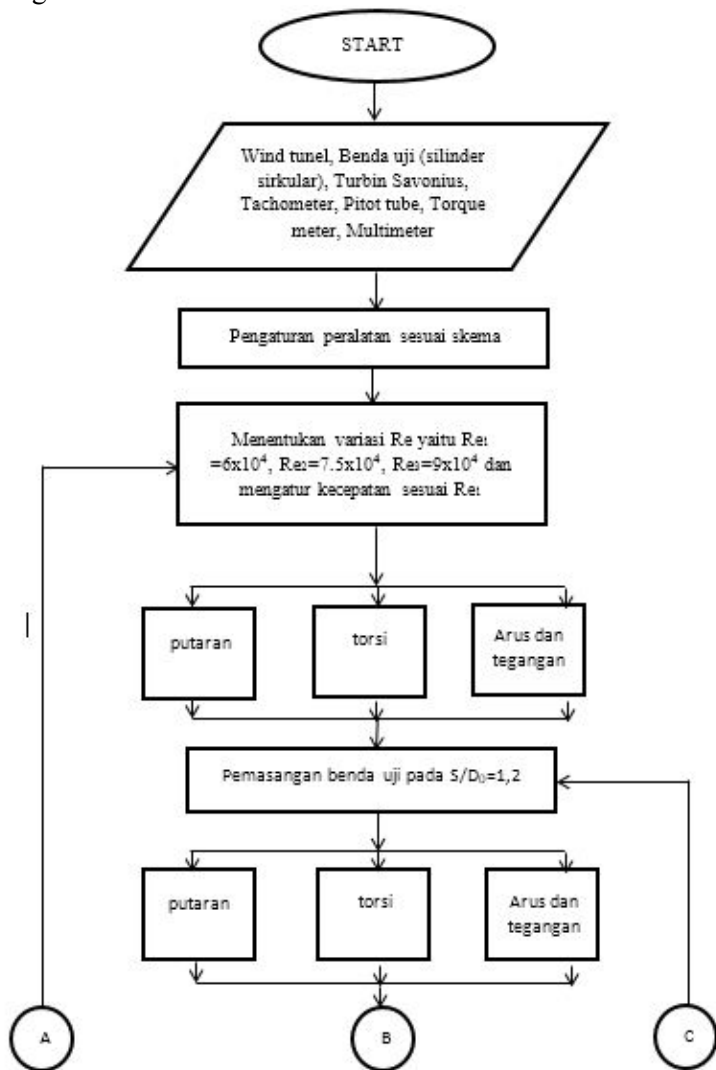
1. Persiapan peralatan dan benda uji berupa silinder sirkular dengan diameter 12 mm.
2. Pemasangan turbin angin *Savonius* pada *test section*.
3. Pengambilan data standar (tanpa penghalang).
4. Menyalakan *fan* dan mengatur besar frekuensi dengan menggunakan *inverter* supaya didapat kecepatan dalam *test section* yang sesuai dengan besar *Reynolds number* yang digunakan.
5. Setelah *steady*, melakukan pengukuran kecepatan angin dengan menggunakan *pitot tube* sehingga diperoleh bilangan *Reynolds* seperti yang diharapkan.
6. Melakukan pengukuran putaran poros turbin angin dengan menggunakan Tachometer.
7. Melakukan pengukuran torsi statis dengan menggunakan Torque meter.
8. Sambungkan poros turbin dengan generator listrik.
9. Melakukan pengukuran tegangan dan kuat arus listrik dengan menggunakan multimeter.
10. Mematikan *fan*.
11. Memasang silinder pengganggu di depan *returning blade* dengan jarak antara pusat *returning blade* turbin angin dan silinder pengganggu (S/D) adalah 1,2.  

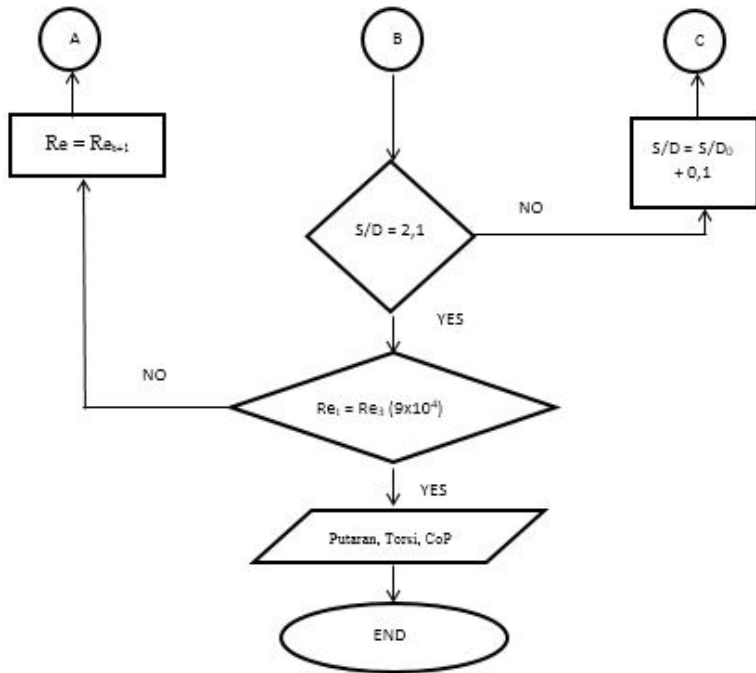
$$(S = 1,2 \times 60 \text{ m} = 72 \text{ m})$$
12. Melakukan pengukuran dengan merubah S/D sebesar 1,2 ; 1,3 ; 1,4 ; 1,5 ; 1,6 ; 1,7 ; 1,8 ; 1,9 ; 2,0 ; 2,1.
13. Mengulangi langkah 4 sampai 12 dengan variasi bilangan *Reynolds* yang lain.
14. Mematikan *fan*.

Mengolah semua data yang diperoleh (putaran, torsi, tegangan dan arus listrik) dan menge-plot dalam grafik torsi terhadap variasi S/D, putaran terhadap variasi S/D, dan *Coefficient of Power (CoP)* terhadap variasi S/D.

### 3.6 Flowchart Pengambilan Data

Urutan langkah pengambilan data yang akan dilakukan dalam penelitian ini dapat digambarkan dalam diagram alir seperti pada gambar 3.8 berikut :





**Gambar 3.11** Flowchart pengambilan data



*{Halaman ini sengaja dikosongkan.}*

## BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Data Penelitian

#### Perhitungan Bilangan Reynolds

- **massa jenis udara (  $\rho$  )**

Dari persamaan Boyle – Gay Lussac mengenai pemuaian gas didapatkan bahwa :

$$\frac{P_1 \times V_1}{T_1} = \frac{P_2 \times V_2}{T_2} \quad (4.1)$$

karena  $V = \frac{m}{\rho}$ , maka persamaan 4.1 berubah menjadi

$$\frac{p_1 \times m_1}{T_1 \times \rho_1} = \frac{p_2 \times m_2}{T_2 \times \rho_2} \quad (4.2)$$

dimana:

$m_1$  = massa udara pada keadaan standar

$m_2$  = massa udara pada saat pengujian

$P_1$  = tekanan absolut udara saat keadaan standar 1,01325 N/m<sup>2</sup>

$P_2$  = tekanan absolut udara pada saat pengujian

$T_1$  = temperatur udara standar = 288,2 K

$T_2$  = temperatur ruangan kerja = 26°C = 299 K

$\rho_1$  = massa jenis udara saat keadaan standar = 1,225 kg/m<sup>3</sup>

$\rho_2$  = massa jenis udara pada saat pengujian

Bila keadaan standar dan keadaan pengujian berada pada ketinggian yang sama, maka :

$$P_1 = P_2$$

Dan karena massa udara pada keadaan standar dan pada keadaan pengujian itu sama, maka :

$$m_1 = m_2$$

Dari batasan tersebut, maka persamaannya menjadi:

$$\rho_2 = \frac{T_1 \times \rho_1}{T_2}$$

$$\rho_2 = \frac{288,2K \times 1,225 \frac{kg}{m^3}}{299K} = 1,18075 \frac{kg}{m^3}$$

- **viskositas absolut udara ( $\mu$ )**

Untuk perhitungan viskositas absolut udara digunakan persamaan Sutherland, yaitu :

$$\mu_2 = \frac{b \times (T_2)^{0,5}}{1 + \frac{S}{T_2}} \quad (4.3)$$

dimana:

$$b = 1,458 \times 10^{-6} \text{ Kg/m.s.K}^{0,5}$$

$$S = 110,4 \text{ K}$$

sehingga:

$$\mu_2 = \frac{1,458 \times 10^{-6} \frac{kg}{m.s.K^{0,5}} \times (298K)^{0,5}}{1 + \frac{110,4K}{299K}} = 1,84127 \times 10^{-5} \frac{kg}{m.s}$$

- **kecepatan freestream**

Berikut merupakan persamaan untuk mendapatkan kecepatan freestream :

$$U_\infty = \frac{Re \times \mu}{\rho_2 \times D} = \frac{60000 \times 1,84127 \times 10^{-5} \frac{kg}{m.s}}{1,18075 \frac{kg}{m^3} \times 0,106m} \quad (4.4)$$

$$U_\infty = 8,83 \text{ m/s}$$



## 4.2 Contoh Perhitungan

### 4.2.1 Perhitungan *Coefficient of Power* (CoP)

Sebagai contoh perhitungan *Coefficient of Power* (CoP) , maka digunakan beberapa data yang ada pada eksperimen peningkatan performa turbin *Savonius* dengan *Reynolds number* sebesar  $6 \times 10^4$ . Data – data yang digunakan adalah sebagai berikut:

- Suhu udara (T) = 299 K
- Massa jenis udara ( $\rho$ ) = 1,18075 kg/m<sup>3</sup>
- Panjang karakteristik turbin *Savonius* (L) = 0,106 m
- Tinggi turbin *Savonius* (H) = 0,08 m
- Kecepatan angin (U) = 8,83 m/s

Pada persamaan 2.9 untuk mendapatkan nilai *Coefficient of Power* (CoP) maka perlu dilakukan perhitungan daya awal dan daya yang dihasilkan terlebih dahulu. Daya awal yang di berikan pada turbin *Savonius* dapat dihitung dengan persamaan 2.6, yaitu sebagai berikut.

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot U^3$$

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L \cdot H \cdot U^3$$

$$P = \frac{1}{2} \cdot 1,18075 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,106 \text{ m} \cdot 0,08 \text{ m} \cdot (8,83 \text{ m/s})^3$$

$$P = \frac{1}{2} \cdot 1,18075 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,106 \text{ m} \cdot 0,08 \text{ m} \cdot (8,83 \text{ m/s})^3$$

$$P = 3.46 \text{ W}$$

Untuk mendapatkan daya yang dihasilkan oleh turbin *Savonius* digunakan data yang didapatkan dari eksperimen, data – data tersebut antara lain: (pada kondisi turbin diberi penghalang berupa silinder sirkular dengan S/D = 1,2)

- Tegangan yang dihasilkan (V) : 1,39 Volt
- Kuat arus yang dihasilkan (I) : 0,0225 Ampere

Dengan menggunakan persamaan 2.8, maka akan diperoleh nilai daya yang dihasilkan turbin. Contoh perhitungan daya yang dihasilkan turbin adalah sebagai berikut.

$$P = V \cdot I$$

$$P = 1,39 \text{ V} \cdot 0,0225 \text{ A}$$

$$P = 0,031256 \text{ W}$$

➤ Menghitung *Coefficient of Power* (CoP)

Untuk menghitung *Coefficient of Power* (CoP) dapat digunakan persamaan 2.9, yaitu sebagai berikut:

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot U^3}$$

$$C_p = \frac{0,031256 \text{ W}}{3,458279 \text{ W}}$$

$$C_p = 0,009038$$

$$C_p = 0,9 \%$$

#### 4.2.2 Perhitungan *Tip Speed Ratio* (TSR)

Perhitungan *Tip Speed Ratio* (TSR) dilakukan dengan membandingkan kecepatan pada ujung turbin *Savonius* dengan kecepatan angin yang digunakan untuk memutar turbin tersebut. Data – data yang dimasukkan pada contoh perhitungan ini menggunakan data yang didapat dari eksperimen dengan kondisi pemberian penghalang berupa silinder sirkular dengan  $Re = 60000$  dan  $S/D = 1,2$ . Persamaan yang akan digunakan untuk menghitung *Tip Speed Ratio* (TSR) adalah sebagai berikut:

$$TSR = \frac{\omega \cdot R}{U} \quad (4.5)$$

dimana;

$\omega$  = kecepatan sudut dari turbin *Savonius* (rad/s)

$R$  = panjang jari – jari dari sudu turbin *Savonius* (m)

$U$  = kecepatan angin yang digunakan untuk memutar turbin *Savonius* (m/s)

Pada pengambilan data yang didapatkan adalah data putaran turbin dengan satuan RPM, maka untuk menghitung TSR perlu diubah ke dalam rad/s. Persamaan yang digunakan untuk mengubah RPM ke dalam rad/s yaitu sebagai berikut.

$$\omega = \frac{2\pi \cdot n}{60} \quad (4.6)$$

dimana:  $n$  = putaran yang dihasilkan turbin (rpm)

Putaran yang dihasilkan oleh turbin *Savonius* pada Re sebesar 60000 dan S/D yang digunakan adalah 1,2 adalah sebesar 539 RPM. Maka,

$$\omega = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 539}{60}$$

$$\omega = 56,42 \text{ rad/s}$$

dengan menggunakan data yang ada pada eksperimen seperti data dibawah, maka akan dapat dilakukan perhitungan *Tip Speed Ratio* (TSR).

$$R = 0,5 \cdot L = 0,5 \cdot 0,106 \text{ m} = 0,053 \text{ m}$$

$$U = 8,83 \text{ m/s}$$

➤ Menghitung *Tip Speed Ratio* (TSR)

$$T = \frac{\omega \cdot R}{U}$$

$$T = \frac{56,41533 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \cdot 0,053 \text{ m}}{8,83 \text{ m/s}}$$

$$T = 0,34$$

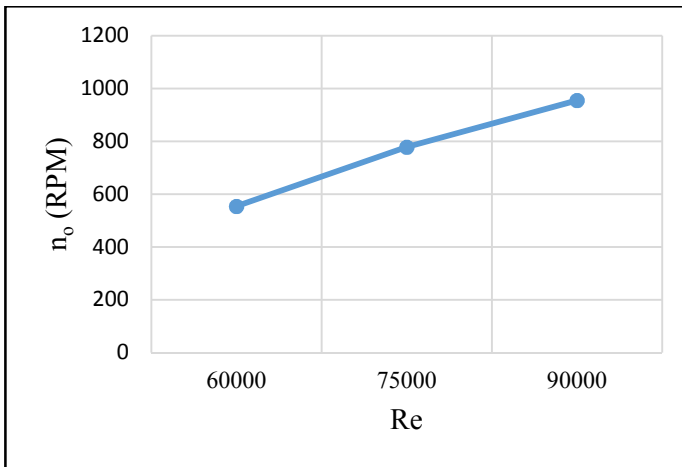
#### 4.3 Analisa Performa Turbin Angin *Savonius* tanpa Pengganggu dengan Variasi Bilangan Reynolds yang Digunakan $6 \times 10^4$ ; $7,5 \times 10^4$ ; dan $9 \times 10^4$

Peforma turbin angin *Savonius* tanpa adanya pemberian pengganggu berupa silinder sirkular atau dapat disebut juga data standard perlu diketahui untuk dibandingkan dengan peforma turbin angin *Savonius* yang diberikan pengganggu berupa silinder sirkular. Hal ini dilakukan untuk mengetahui besarnya

peningkatan performa yang dihasilkan oleh pemberian pengganggu berupa silinder sirkular dengan konfigurasi yang divariasikan yaitu *Reynolds Number* dan jarak antara pusat turbin angin *Savonius* dengan pusat silinder sirkular (S/D). Pengukuran performa turbin angin *Savonius* tanpa adanya pemberian pengganggu dilakukan pada suhu  $T = 26^\circ$ .

#### 4.3.1 Analisa Putaran Turbin Angin *Savonius* tanpa Pengganggu

Gambar 4.1 menunjukkan grafik putaran turbin angin *Savonius* tanpa pengganggu berupa silinder sirkular ( $n_o$ ) fungsi *Reynolds Number* ( $Re$ ). Pengambilan data putaran dilakukan pada variasi *Reynolds Number* berturut – turut yaitu  $6 \times 10^4$ ;  $7,5 \times 10^4$ ; dan  $9 \times 10^4$ .



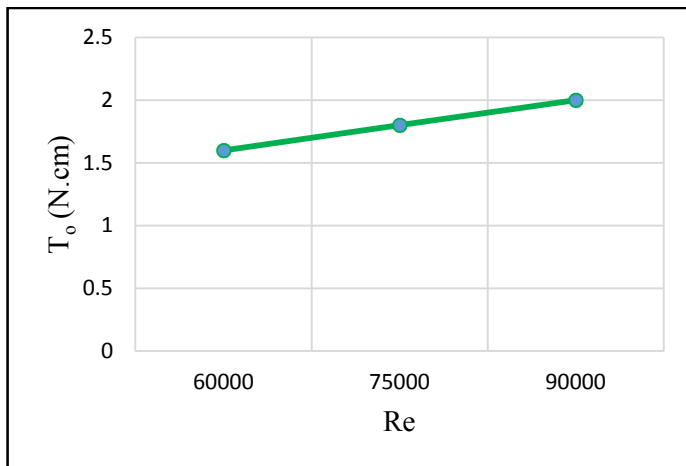
**Gambar 4.1** Grafik putaran turbin angin *Savonius* tanpa pengganggu sebagai fungsi *Reynolds Number*

Dari gambar 4.1 diatas dapat dilihat trendline data putaran standard yang dihasilkan oleh turbin angin *Savonius*. Pada kondisi  $Re = 60000$  didapatkan nilai  $n_o = 554$  RPM. Pada kondisi  $Re = 75000$  didapatkan nilai  $n_o = 778$  RPM. Pada kondisi  $Re = 90000$

didapatkan nilai  $n_o = 955$  RPM. Dari trendline tersebut dapat dikatakan bahwa semakin besar nilai *Reynolds Number* maka nilai putaran yang dihasilkan oleh turbin *Savonius* juga semakin besar. Hal ini dikarenakan semakin besar nilai *Reynolds Number* maka nilai dari kecepatan udara semakin besar. Sedangkan pada persamaan (2.10) tertera bahwa kecepatan sebanding dengan gaya drag yang menumbuk sisi *blade* turbin *Savonius*. Sehingga semakin meningkat kecepatan udara yang melewati turbin *Savonius* maka gaya drag yang menumbuk turbin juga akan meningkat, hal ini menyebabkan putaran yang dihasilkan oleh turbin juga akan meningkat.

#### 4.3.2 Analisa Torsi Statis Turbin Angin *Savonius* tanpa Pengganggu

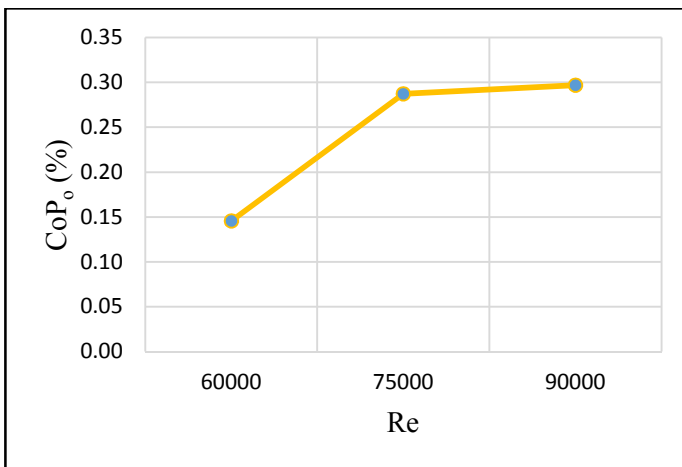
Gambar 4.2 menunjukkan grafik torsi statis turbin angin *Savonius* tanpa pengganggu berupa silinder sirkular ( $T_{s_o}$ ) fungsi *Reynolds Number* ( $Re$ ). Pengambilan data putaran dilakukan pada variasi *Reynolds Number* berturut – turut yaitu  $6 \times 10^4$ ;  $7,5 \times 10^4$ ; dan  $9 \times 10^4$ .



**Gambar 4.2** Grafik torsi statis turbin angin *Savonius* tanpa pengganggu sebagai fungsi *Reynolds Number*

Dari gambar 4.2 diatas dapat dilihat trendline data torsi statis standard yang dihasilkan oleh turbin angin *Savonius*. Pada kondisi  $Re = 60000$  didapatkan nilai  $T_o = 1,6$  N.cm. Pada kondisi  $Re = 75000$  didapatkan nilai  $T_o = 1,8$  N.cm. Pada kondisi  $Re = 90000$  didapatkan nilai  $T_o = 2$  N.cm. Dari trendline tersebut dapat dikatakan bahwa semakin besar nilai *Reynolds Number* maka nilai torsi statis yang dihasilkan oleh turbin *Savonius* juga semakin besar. Hal ini dikarenakan semakin besar nilai *Reynolds Number* maka nilai dari kecepatan udara semakin besar. Sedangkan pada persamaan (2.10) tertera bahwa kecepatan sebanding dengan gaya drag yang menumbuk sisi *blade* turbin *Savonius*. Sehingga semakin meningkat kecepatan udara yang melewati turbin *Savonius* maka gaya drag yang menumbuk turbin juga akan meningkat, hal ini menyebabkan torsi statis yang dihasilkan oleh turbin juga akan meningkat.

#### 4.3.3 Analisa *Coefficient of Power* Turbin Angin *Savonius* tanpa Pengganggu



**Gambar 4.3** Grafik *Coefficient of Power* turbin angin *Savonius* tanpa pengganggu sebagai fungsi *Reynolds Number*

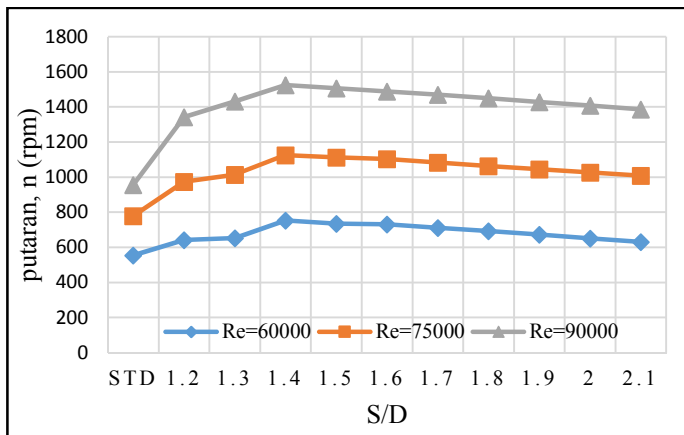
Gambar 4.3 menunjukkan grafik *Coefficient of Power* turbin angin *Savonius* tanpa pengganggu berupa silinder sirkular ( $CoP_o$ ) fungsi *Reynolds Number* ( $Re$ ). Pengambilan data putaran dilakukan pada variasi *Reynolds Number* berturut – turut yaitu  $6 \times 10^4$ ;  $7,5 \times 10^4$ ; dan  $9 \times 10^4$ .

Dari gambar 4.3 diatas dapat dilihat trendline data *Coefficient of Power* standard yang dihasilkan oleh turbin angin *Savonius*. Pada kondisi  $Re = 60000$  didapatkan nilai  $CoP_o = 0,15$  %. Pada kondisi  $Re = 75000$  didapatkan nilai  $CoP_o = 0,29$  %. Pada kondisi  $Re = 90000$  didapatkan nilai  $CoP_o = 0,30$  %. Dari trendline tersebut dapat dikatakan bahwa semakin besar nilai *Reynolds Number* maka nilai *Coefficient of Power* yang dihasilkan oleh turbin *Savonius* juga semakin besar. Hal ini dikarenakan semakin besar nilai *Reynolds Number* maka nilai dari kecepatan udara semakin besar. Sedangkan pada persamaan (2.10) tertera bahwa kecepatan sebanding dengan gaya drag yang menumbuk sisi *blade* turbin *Savonius*. Sehingga semakin meningkat kecepatan udara yang melewati turbin *Savonius* maka gaya drag yang menumbuk turbin juga akan meningkat, hal ini menyebabkan *Coefficient of Power* yang dihasilkan oleh turbin juga akan meningkat. *Coefficient of Power* adalah rasio antara daya output yang dihasilkan oleh turbin dengan daya input untuk memutar turbin atau dalam penelitian ini yaitu energi angin. Dari grafik diatas dapat dikatakan bahwa semakin meningkat nilai *Reynolds Number* maka energi angin yang bekerja pada turbin *Savonius* dan daya *output* yang dihasilkan juga meningkat. Namun peningkatan pada daya *output* lebih besar jika dibandingkan dengan peningkatan pada daya *input*. Sehingga didapatkan nilai  $CoP$  yang meningkat seiring dengan peningkatan nilai *Reynolds Number* yang diberikan pada penelitian ini.

#### 4.4 Analisa Performa Turbin Angin *Savonius* Berpengganggu dengan Variasi S/D dan Bilangan Reynolds yang Digunakan Berturut – turut Adalah $1,2 \leq S/D \leq 2,1$ dan $6 \times 10^4$ ; $7,5 \times 10^4$ ; dan $9 \times 10^4$

##### 4.4.1 Analisa Putaran Turbin Angin *Savonius* Berpengganggu

Pengukuran putaran dilakukan pada turbin *Savonius* dengan pemberian pengganggu berupa silinder sirkular dengan diameter 12 mm. Alat ukur yang digunakan untuk mengukur putaran pada penelitian ini adalah *Tachometer*, dengan pemberian *scotlight* pada salah satu sisi *blade* turbin maka putaran dari turbin *Savonius* dapat diketahui. Benda pengganggu diletakkan di depan sisi *returning blade* turbin dengan variasi yang digunakan yaitu S/D dan *Reynolds Number*.

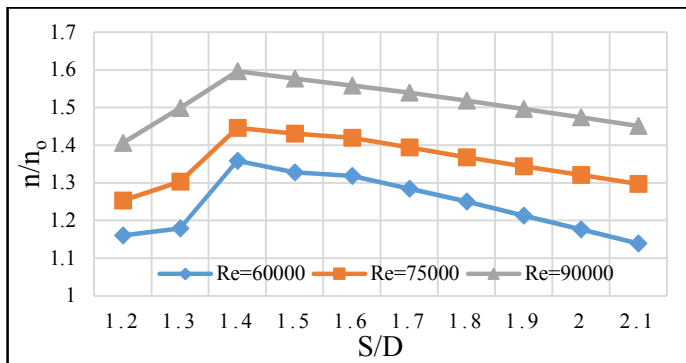


**Gambar 4.4** Grafik putaran turbin angin *Savonius* berpengganggu sebagai fungsi S/D pada  $Re = 6 \times 10^4$ ;  $7,5 \times 10^4$ ; dan  $9 \times 10^4$

Dari gambar 4.4 diatas pada setiap konfigurasi S/D dari 1,2 sampai dengan 2,1 terlihat bahwa semakin besar *Reynolds Number* yang digunakan maka menghasilkan putaran turbin yang



semakin besar pula. Hal ini dikarenakan semakin besar nilai *Reynolds Number* maka nilai dari kecepatan udara semakin besar. Sedangkan pada persamaan (2.10) tertera bahwa kecepatan sebanding dengan gaya drag yang menumbuk sisi *blade* turbin *Savonius*. Sehingga semakin meningkat kecepatan udara yang melewati turbin *Savonius* maka gaya drag yang menumbuk turbin juga akan meningkat, hal ini menyebabkan putaran yang dihasilkan oleh turbin juga akan meningkat. Nilai putaran tertinggi pada setiap *Re* yang digunakan terletak pada konfigurasi  $S/D = 1,4$  yaitu penempatan silinder sirkular sebagai benda pengganggu sejauh 84 mm dari pusat *returning blade*. Pada konfigurasi  $S/D=1,4$  dengan  $Re= 6 \times 10^4$  nilai putaran yang dihasilkan sebesar 752,56 RPM; dengan  $Re= 7,5 \times 10^4$  nilai putaran yang dihasilkan sebesar 1124,9 RPM; dengan  $Re= 9 \times 10^4$  nilai putaran yang dihasilkan sebesar 1524,5 RPM. Pada nilai *Reynolds Number* yang konstan, putaran selalu naik dari  $S/D= 1,2$  sampai dengan  $S/D=1,4$ . Kemudian dari  $S/D= 1,4$  sampai dengan  $S/D= 2,1$  nilai putaran yang dihasilkan mengalami penurunan. Disisi lain, penambahan pengganggu berupa silinder sirkular juga mengakibatkan akan didapatkan nilai putaran yang sama pada posisi  $S/D$  yang berbeda.



**Gambar 4.5** Grafik peningkatan putaran turbin angin *Savonius* berpengganggu terhadap putaran standar sebagai fungsi  $S/D$  pada  $Re = 6 \times 10^4$ ;  $7,5 \times 10^4$ ; dan  $9 \times 10^4$

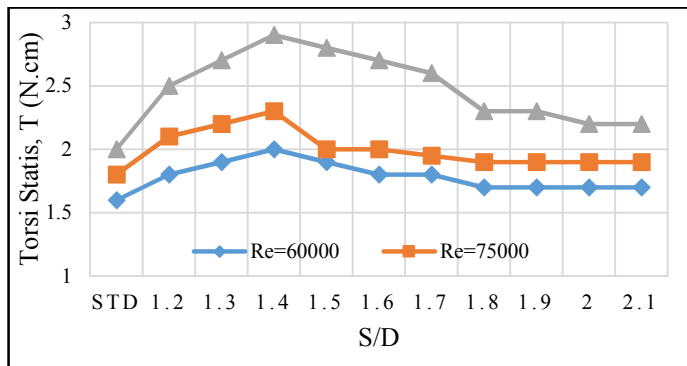
Gambar 4.5 menjelaskan besarnya peningkatan putaran dari turbin *Savonius* yang diberikan pengganggu berupa silinder sirkular. Peningkatan putaran ini disajikan dalam bentuk grafik  $n/n_0$  fungsi  $S/D$ . Dimana nilai peningkatan putaran didapatkan dari pembagian antara nilai putaran turbin berpengganggu dengan nilai putaran turbin tanpa pengganggu. Dari gambar 4.5 dapat dilihat bahwa peningkatan terbaik didapatkan pada konfigurasi  $S/D = 1,4$ . Pada konfigurasi  $S/D = 1,4$  dengan  $Re = 6 \times 10^4$  nilai peningkatan putaran yang dihasilkan sebesar 1,36; dengan  $Re = 7,5 \times 10^4$  nilai peningkatan putaran yang dihasilkan sebesar 1,45; dengan  $Re = 9 \times 10^4$  nilai peningkatan putaran yang dihasilkan sebesar 1,60. Untuk semua  $S/D$  dan *Reynolds Number* yang digunakan pada penelitian ini menghasilkan nilai peningkatan putaran yang lebih besar dari pada satu. Hal ini menunjukkan bahwa pemberian benda pengganggu berupa silinder sirkular didepan sisi *returning blade* akan menghasilkan nilai putaran yang lebih besar daripada nilai putaran yang dihasilkan oleh turbin *Savonius* tanpa pengganggu. Hasil paling optimal didapatkan pada konfigurasi  $S/D = 1,4$ .

Penambahan pengganggu berupa silinder sirkular di depan sisi *returning blade* dapat mengurangi gaya drag pada sisi *returning blade*. Berkurangnya gaya drag pada sisi *returning blade* ini disebabkan oleh terganggunya aliran yang menumbuk sisi *returning blade* oleh silinder sirkuler. Akibat dari terganggunya aliran oleh silinder pengganggu menyebabkan transisi aliran dari laminar menjadi turbulen semakin cepat. Oleh karena itu titik sparasi dari *returning blade* menjadi mundur kemudian daerah wake pada sisi *returning blade* mengecil. Disisi lain, pemasangan silinder menyebabkan tekanan di depan sisi *returning blade* akan menurun, sedangkan tekanan di belakang sisi *returning blade* diasumsikan sama dengan tidak menggunakan pengganggu sehingga gaya drag menurun. Akibatnya selisih gaya drag antara sisi *returning blade* dan *advancing blade* semakin besar. Hal ini akan menghasilkan putaran yang lebih besar daripada tidak diberikan pengganggu.

Karena putaran meningkat maka torsi dan daya yang dihasilkan juga akan meningkat. Selain pengaruh silinder pengganggu, variasi jarak juga memberikan pengaruh terhadap putaran yang dihasilkan oleh turbin *Savonius*. Pada S/D yang dekat dengan sisi *returning blade* akan memberikan pengaruh yang sangat efektif terhadap performa turbin *Savonius*. Pada jarak yang lebih jauh maka silinder pengganggu sudah tidak efektif lagi mengganggu aliran yang melewati sisi *returning blade*. Apabila jarak yang diberikan sangat jauh maka performa yang dihasilkan akan seperti tidak diberikan benda pengganggu.

#### 4.4.2 Analisa Torsi Statis Turbin Angin *Savonius* Berpengganggu

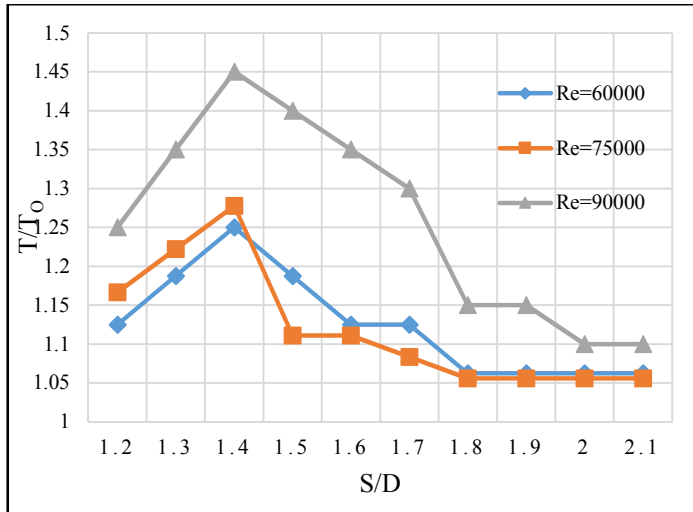
Pengukuran torsi statis dilakukan agar mengetahui pengaruh yang dihasilkan oleh penambahan pengganggu berupa silinder sirkular serta pemberian variasi S/D terhadap performa yang dihasilkan oleh turbin angin *Savonius*. Pengukuran torsi statis turbin dilakukan dengan menahan turbin agar tidak berputar pada posisi  $0^\circ$ . Alat ukur torsi statis yang digunakan pada penelitian ini adalah *torquemeter* yang dihubungkan langsung pada poros turbin.



**Gambar 4.6** Grafik torsi statis turbin angin *Savonius* berpengganggu sebagai fungsi S/D pada  $Re = 6 \times 10^4$ ;  $7,5 \times 10^4$ ; dan  $9 \times 10^4$

Dari gambar 4.6 diatas pada setiap konfigurasi S/D dari 1,2 sampai dengan 2,1 terlihat bahwa semakin besar *Reynolds Number* yang digunakan maka menghasilkan torsi statis turbin yang semakin besar pula. Hal ini dikarenakan semakin besar nilai *Reynolds Number* maka nilai dari kecepatan udara semakin besar. Sedangkan pada persamaan (2.10) tertera bahwa kecepatan sebanding dengan gaya drag yang menumbuk sisi *blade* turbin *Savonius*. Sehingga semakin meningkat kecepatan udara yang melewati turbin *Savonius* maka gaya drag yang menumbuk turbin juga akan meningkat, hal ini menyebabkan selisih torsi antara *advancing blade* dan *returning blade* meningkat sehingga torsi statis yang dihasilkan oleh turbin juga akan meningkat. Nilai torsi statis tertinggi pada setiap *Reynolds number* yang digunakan terletak pada konfigurasi S/D = 1,4 yaitu penempatan silinder sirkular sebagai benda pengganggu sejauh 84 mm dari pusat *returning blade*. Pada konfigurasi S/D= 1,4 dengan  $Re = 6 \times 10^4$  nilai torsi statis yang dihasilkan sebesar 2 N.cm; dengan  $Re = 7,5 \times 10^4$  nilai torsi statis yang dihasilkan sebesar 2,3 N.cm; dengan  $Re = 9 \times 10^4$  nilai torsi statis yang dihasilkan sebesar 2,9 N.cm. Pada masing – masing *Reynolds number* yang digunakan nilai torsi statis selalu naik dari S/D= 1,2 sampai dengan S/D=1,4. Kemudian dari S/D= 1,4 sampai dengan S/D= 2,1 nilai torsi statis yang dihasilkan mengalami penurunan. Disisi lain, penambahan pengganggu berupa silinder sirkular juga mengakibatkan akan didapatkan nilai torsi statis yang sama pada posisi S/D yang berbeda.

Gambar 4.7 menjelaskan besarnya peningkatan torsi statis dari turbin angin *Savonius* yang diberikan pengganggu berupa silinder sirkular didepan sisi *returning blade*. Peningkatan torsi statis ini disajikan dalam bentuk grafik  $T/T_0$  fungsi S/D. Dimana nilai peningkatan torsi statis didapatkan dari pembagian antara nilai torsi statis turbin berpengganggu dengan nilai torsi statis turbin tanpa pengganggu.



**Gambar 4.7** Grafik peningkatan torsi statis turbin angin *Savonius* berpengganggu terhadap torsi statis standar sebagai fungsi S/D pada  $Re = 6 \times 10^4$ ;  $7,5 \times 10^4$ ; dan  $9 \times 10^4$

Dari gambar 4.7 dapat dilihat bahwa peningkatan terbaik didapatkan pada konfigurasi S/D= 1,4. Pada konfigurasi S/D=1,4 dengan  $Re = 6 \times 10^4$  nilai peningkatan torsi statis yang dihasilkan sebesar 1,25; dengan  $Re = 7,5 \times 10^4$  nilai peningkatan torsi statis yang dihasilkan sebesar 1,28; dengan  $Re = 9 \times 10^4$  nilai peningkatan torsi statis yang dihasilkan sebesar 1,45. Untuk semua S/D dan *Reynolds Number* yang digunakan pada penelitian ini menghasilkan nilai peningkatan torsi statis yang lebih besar dari pada satu. Hal ini menunjukkan bahwa pemberian benda pengganggu berupa silinder sirkular di depan sisi *returning blade* akan menghasilkan nilai torsi statis yang lebih besar daripada nilai torsi statis yang dihasilkan oleh turbin *Savonius* tanpa pengganggu. Hasil paling optimal didapatkan pada konfigurasi S/D= 1,4.

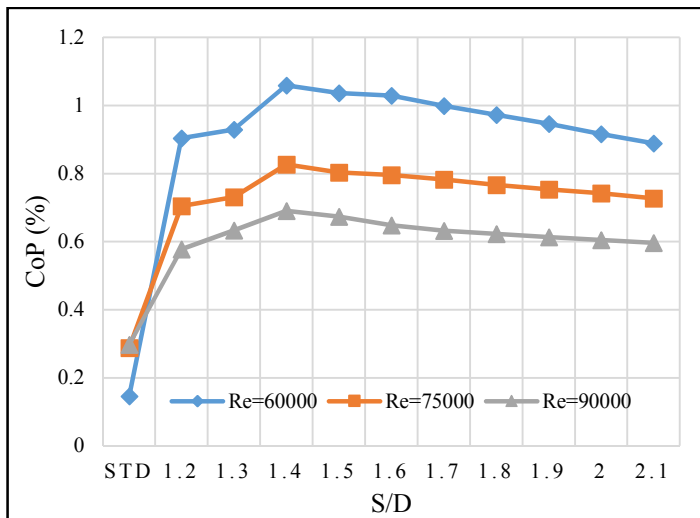
Penambahan pengganggu berupa silinder sirkular di depan sisi *returning blade* dapat mengurangi gaya drag pada sisi

*returning blade*. Berkurangnya gaya drag pada sisi *returning blade* ini disebabkan oleh terganggunya aliran yang menumbuk sisi *returning blade* oleh silinder sirkuler. Akibat dari terganggunya aliran oleh silinder pengganggu menyebabkan partikel - partikel udara bergerak semakin acak sehingga transisi aliran dari laminar menjadi turbulen semakin cepat. Oleh karena itu titik sparasi dari *returning blade* menjadi mundur kemudian daerah wake pada sisi *returning blade* mengecil. Disisi lain, pemasangan silinder pengganggu menyebabkan tekanan di depan sisi *returning blade* akan menurun, sedangkan tekanan di belakang sisi *returning blade* diasumsikan sama dengan tidak menggunakan pengganggu. Akibatnya selisih gaya drag antara sisi *returning blade* dan *advancing blade* semakin besar. Hal ini akan menghasilkan torsi statis yang lebih besar daripada tidak diberikan pengganggu. Karena torsi statis meningkat maka daya yang dihasilkan juga akan meningkat. Selain pengaruh silinder pengganggu, variasi jarak juga memberikan pengaruh terhadap torsi statis yang dihasilkan oleh turbin *Savonius*. Pada S/D yang dekat dengan sisi *returning blade* akan memberikan pengaruh yang sangat efektif terhadap performa turbin *Savonius*. Pada jarak yang lebih jauh maka silinder pengganggu sudah tidak efektif lagi mengganggu aliran yang melewati sisi *returning blade*. Apabila jarak yang diberikan sangat jauh maka performa yang dihasilkan akan seperti tidak diberikan benda pengganggu.

#### **4.4.3 Analisa *Coefficient of Power* (CoP) Turbin Angin *Savonius* Berpengganggu**

Pengukuran *Coefficient of Power* dilakukan agar mengetahui pengaruh yang dihasilkan oleh penambahan pengganggu berupa silinder sirkular serta pemberian variasi S/D terhadap peforma yang dihasilkan oleh turbin angin *Savonius*. Pengukuran dilakukan dengan menyambungkan poros turbin pada generator yang dirangkai dengan lampu sebagai beban. Sedangkan alat ukur yang digunakan untuk mengetahui nilai tegangan dan arus listrik pada penelitian ini yaitu *multimeter*.

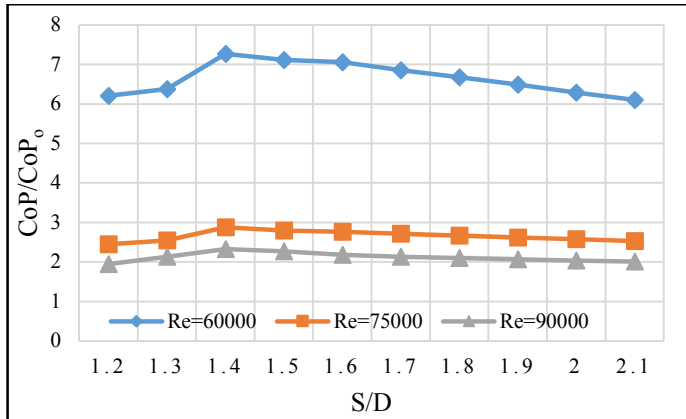
Pada penelitian ini poros turbin dan poros generator disambung dengan menggunakan *flexible joint*. Kemudian untuk mendapatkan besar nilai *Coefficient of Power* pada penelitian ini digunakan persamaan (2.9). Diameter silinder sirkular sebagai pengganggu yang digunakan pada penelitian ini sebesar 12 mm. Benda pengganggu diletakkan di depan sisi *returning blade* turbin dengan variasi yang digunakan yaitu S/D dan *Reynolds Number*. Analisa *Coefficient of Power* dari turbin angin *Savonius* yang diberikan pengganggu berupa silinder sirkular dilakukan dengan plot grafik besar nilai *Coefficient of Power* (%) yang dihasilkan oleh turbin terhadap variasi S/D serta variasi *Reynolds number* seperti terlihat pada gambar 4.8. Dari grafik tersebut dapat diketahui besar pengaruh penambahan benda pengganggu berupa silinder sirkular terhadap performa yang dihasilkan oleh turbin angin *Savonius*.



**Gambar 4.8** Grafik *Coefficient of Power* turbin angin *Savonius* berpengganggu sebagai fungsi S/D pada  $Re = 6 \times 10^4$ ;  $7,5 \times 10^4$ ; dan  $9 \times 10^4$

Dari gambar 4.8 diatas pada setiap konfigurasi S/D dari 1,2 sampai dengan 2,1 terlihat bahwa semakin besar *Reynolds Number* yang digunakan maka menghasilkan nilai *Coefficient of Power* turbin yang semakin menurun. Hal ini dikarenakan semakin besar nilai *Reynolds Number* maka nilai dari kecepatan udara semakin besar. Sedangkan pada persamaan (2.10) tertera bahwa kecepatan sebanding dengan gaya drag yang menumbuk sisi *blade* turbin *Savonius*. Sehingga semakin meningkat kecepatan udara yang melewati turbin *Savonius* maka gaya drag yang menumbuk turbin juga akan meningkat, hal ini menyebabkan selisih torsi antara *advancing blade* dan *returning blade* meningkat sehingga daya *output* yang dihasilkan oleh turbin juga akan meningkat, namun tidak sebanding jika dibandingkan dengan peningkatan daya *input* turbin yang dipengaruhi oleh besar nilai *Reynolds number*. Oleh karena itu, seiring dengan peningkatan nilai *Reynolds number* yang diberikan pada penelitian ini, maka didapatkan nilai *Coefficient of Power* yang semakin kecil. Nilai *Coefficient of Power* tertinggi pada penelitian ini didapatkan dengan menggunakan  $Re = 60000$ . Nilai *Coefficient of Power* tertinggi pada setiap *Reynolds number* yang digunakan terletak pada konfigurasi  $S/D = 1,4$  yaitu penempatan silinder sirkular sebagai benda pengganggu sejauh 84 mm dari pusat *returning blade*. Pada konfigurasi  $S/D = 1,4$  dengan  $Re = 6 \times 10^4$  nilai *Coefficient of Power* yang dihasilkan sebesar 1,059 %; dengan  $Re = 7,5 \times 10^4$  nilai *Coefficient of Power* yang dihasilkan sebesar 0,827%; dengan  $Re = 9 \times 10^4$  nilai *Coefficient of Power* yang dihasilkan sebesar 0,690%. Pada masing – masing *Reynolds number* yang digunakan nilai *Coefficient of Power* selalu naik dari  $S/D = 1,2$  sampai dengan  $S/D = 1,4$ . Kemudian dari  $S/D = 1,4$  sampai dengan  $S/D = 2,1$  nilai *Coefficient of Power* yang dihasilkan mengalami penurunan. Disisi lain, penambahan pengganggu berupa silinder sirkular juga mengakibatkan akan didapatkan nilai *Coefficient of Power* yang sama pada posisi S/D yang berbeda.





**Gambar 4.9** Grafik peningkatan *Coefficient of Power* turbin angin *Savonius* berpengganggu terhadap *Coefficient of Power* standar sebagai fungsi  $S/D$  pada  $Re = 6 \times 10^4$ ,  $7,5 \times 10^4$ , dan  $9 \times 10^4$

Gambar 4.9 menjelaskan besarnya peningkatan dan penambahan *Coefficient of Power* dari turbin angin *Savonius* yang diberikan pengganggu berupa silinder sirkular didepan sisi *returning blade*. Peningkatan *Coefficient of Power* ini disajikan dalam bentuk grafik  $CoP/CoP_0$  fungsi  $S/D$ . Dimana nilai peningkatan *Coefficient of Power* didapatkan dari pembagian antara nilai *Coefficient of Power* turbin berpengganggu dengan nilai *Coefficient of Power* turbin tanpa pengganggu. Dari gambar 4.9 dapat dilihat bahwa peningkatan dan penambahan terbaik didapatkan pada konfigurasi  $Re = 60000$  dengan  $S/D = 1,4$ . Pada konfigurasi  $S/D = 1,4$  dengan  $Re = 6 \times 10^4$  nilai peningkatan *Coefficient of Power* yang dihasilkan sebesar 7,27; dengan  $Re = 7,5 \times 10^4$  nilai peningkatan *Coefficient of Power* yang dihasilkan sebesar 2,87; dengan  $Re = 9 \times 10^4$  nilai peningkatan *Coefficient of Power* yang dihasilkan sebesar 2,32. Untuk semua  $S/D$  dan *Reynolds Number* yang digunakan pada penelitian ini menghasilkan nilai peningkatan *Coefficient of Power* yang lebih besar dari pada satu. Hal ini menunjukkan bahwa pemberian

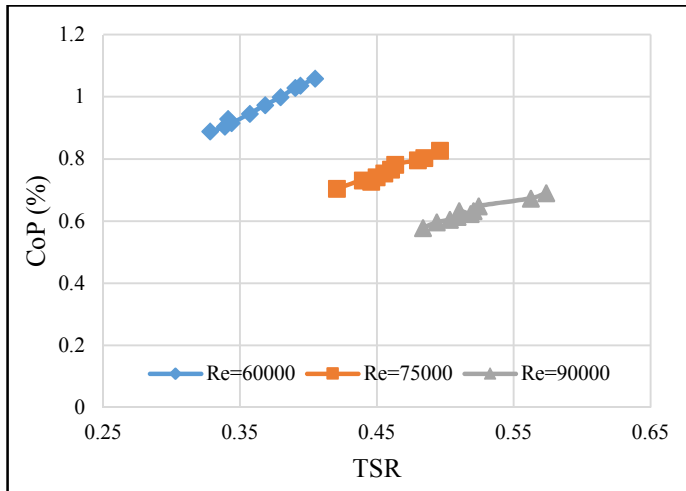
benda pengganggu berupa silinder sirkular didepan sisi *returning blade* akan menghasilkan nilai *Coefficient of Power* yang lebih besar daripada nilai *Coefficient of Power* yang dihasilkan oleh turbin *Savonius* tanpa pengganggu. Hasil paling optimal didapatkan pada konfigurasi  $S/D = 1,4$ .

Penambahan pengganggu berupa silinder sirkular di depan sisi *returning blade* dapat mengurangi gaya drag pada sisi *returning blade*. Berkurangnya gaya drag pada sisi *returning blade* ini disebabkan oleh terganggunya aliran yang menumbuk sisi *returning blade* oleh silinder sirkuler. Akibat dari terganggunya aliran oleh silinder pengganggu menyebabkan partikel - partikel udara bergerak semakin acak sehingga transisi aliran dari laminar menjadi turbulen semakin cepat. Oleh karena itu titik sparasi dari *returning blade* menjadi mundur kemudian daerah wake pada sisi *returning blade* mengecil. Hal ini menyebabkan tekanan di depan sisi *returning blade* akan menurun, sedangkan tekanan di belakang sisi *returning blade* diasumsikan sama dengan tidak menggunakan pengganggu. Akibatnya selisih gaya drag antara sisi *returning blade* dan *advancing blade* semakin besar. Pada pembahasan sebelumnya telah diterangkan bahwa pemasangan silinder pengganggu di depan *returning blade* akan menghasilkan putaran dan torsi statis yang lebih besar daripada tidak diberikan pengganggu. Karena putaran dan torsi statis sebanding dengan daya yang dihasilkan, maka daya yang dihasilkan juga akan meningkat. Peningkatan daya *output* ini tidak sebanding dengan peningkatan daya *input* yang dipengaruhi oleh perubahan nilai *Reynolds number*, oleh karena itu nilai *Coefficient of Power* yang dihasilkan dengan diberikan pengganggu lebih besar daripada nilai *Coefficient of Power* tanpa pengganggu. Selain pengaruh silinder pengganggu, variasi jarak juga memberikan pengaruh terhadap *Coefficient of Power* yang dihasilkan oleh turbin *Savonius*. Pada  $S/D$  yang dekat dengan sisi *returning blade* akan memberikan pengaruh yang sangat efektif terhadap performa turbin *Savonius*. Pada jarak yang lebih jauh maka silinder pengganggu sudah tidak efektif lagi

mengganggu aliran yang melewati sisi *returning blade*. Apabila jarak yang diberikan sangat jauh maka performa yang dihasilkan akan seperti tidak diberikan benda pengganggu.

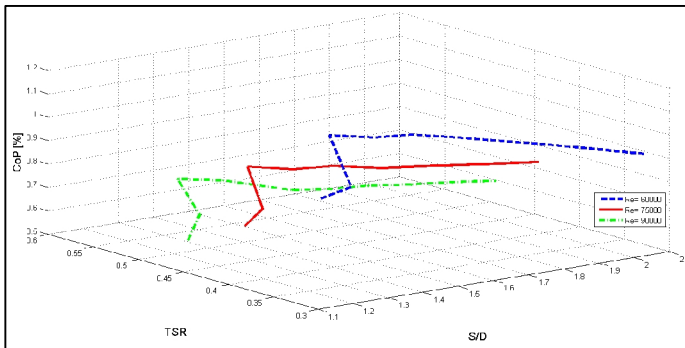
#### 4.4.4 Analisa *Coefficient of Power* (CoP) Turbin Angin *Savonius* Berpengganggu terhadap Perubahan *Tip Speed Ratio* (TSR)

Gambar 4.10 menjelaskan tentang besar nilai *Coefficient of Power* dan *Tip Speed Ratio* pada penelitian turbin *Savonius* dengan pemberian benda pengganggu berupa silinder sirkular didepan sisi *returning blade*. Pada penelitian ini digunakan silinder pengganggu dengan diameter 12 mm. Besar nilai  $S/D$  dan *Reynolds number* divariasikan berturut – turut yaitu  $1,2 \leq S/D \leq 2,1$  dan  $6 \times 10^4$ ;  $7,5 \times 10^4$ ; dan  $9 \times 10^4$ . Adapun TSR adalah parameter tak berdimensi yang besarnya didapatkan melalui pengukuran kecepatan angin dan kecepatan tepi sudu turbin saat turbin dibebani.



**Gambar 4.10** Grafik *Coefficient of Power* turbin angin *Savonius* berpengganggu sebagai fungsi TSR pada  $Re = 6 \times 10^4$ ;  $7,5 \times 10^4$ ; dan  $9 \times 10^4$

Pada gambar 4.10 terlihat bahwa dari  $TSR = 0,3$  sampai dengan  $TSR = 0,6$  besar nilai *Coefficient of Power* berbanding lurus dengan besar nilai *Tip Speed Ratio* yang dihasilkan turbin. Pada masing – masing  $Re$  yang digunakan dari  $TSR = 0,3$  sampai dengan  $TSR = 0,6$  semakin besar nilai  $TSR$  maka akan menghasilkan nilai  $CoP$  yang semakin besar pula. Pada  $Re = 6 \times 10^4$  nilai *Coefficient of Power* terbesar yang dihasilkan sebesar 1,059 % dengan nilai *Tip Speed Ratio* sebesar 0,4046; pada  $Re = 7,5 \times 10^4$  nilai *Coefficient of Power* terbesar yang dihasilkan sebesar 0,827% dengan nilai *Tip Speed Ratio* sebesar 0,496; pada  $Re = 9 \times 10^4$  nilai *Coefficient of Power* terbesar yang dihasilkan sebesar 0,690% dengan nilai *Tip Speed Ratio* sebesar 0,5736.



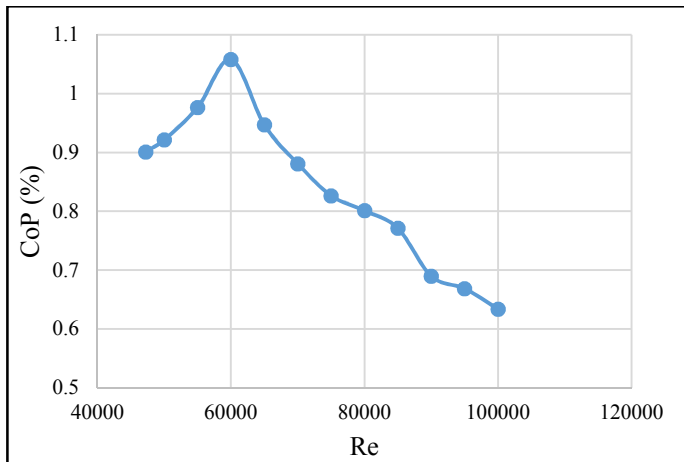
**Gambar 4.11** Grafik  $CoP$  turbin angin *Savonius* berpengganggu terhadap  $TSR$  dan  $S/D$  pada  $Re = 6 \times 10^4$ ;  $7,5 \times 10^4$ ; dan  $9 \times 10^4$

Gambar 4.11 merupakan grafik *Coefficient of Power* turbin angin *Savonius* terhadap *Tip Speed Ratio* yang disajikan dalam bentuk 3D. Grafik diatas memperlihatkan bahwa seiring dengan meningkatnya bilangan *Reynolds*, maka  $TSR$  yang dihasilkan juga meningkat, sedangkan nilai  $CoP$  yang dihasilkan semakin menurun. Pada  $S/D$  1,2 sampai dengan  $S/D$  1,4 besarnya nilai  $CoP$  meningkat seiring dengan peningkatan nilai  $TSR$ , sedangkan pada  $S/D$  1,4 sampai dengan  $S/D$  2,1 nilai  $CoP$

menurun seiring dengan penurunan nilai TSR. Pada Re yang sama menghasilkan nilai CoP dan TSR yang berbeda – beda, nilai CoP dan TSR terbesar dihasilkan pada S/D 1,4, hal ini dikarenakan adanya pengaruh variasi jarak (S/D) yang diberikan pada penelitian ini. Pemberian pengganggu didepan sisi *returning blade* serta pemberian variasi jarak pada benda pengganggu ini akan sangat efektif meningkatkan performa dari turbin *Savonius*. Penambahan pengganggu berupa silinder sirkular di depan sisi *returning blade* dapat mengurangi gaya drag pada sisi *returning blade*. Berkurangnya gaya drag pada sisi *returning blade* ini disebabkan oleh terganggunya aliran yang menumbuk sisi *returning blade* oleh silinder sirkuler. Akibat dari terganggunya aliran oleh silinder pengganggu menyebabkan partikel - partikel udara bergerak semakin acak sehingga transisi aliran dari laminar menjadi turbulen semakin cepat. Oleh karena itu titik sparasi dari *returning blade* menjadi mundur kemudian daerah wake pada sisi *returning blade* mengecil. Hal ini menyebabkan tekanan di depan sisi *returning blade* akan menurun, sedangkan tekanan di belakang sisi *returning blade* diasumsikan sama dengan tidak menggunakan pengganggu. Akibatnya selisih gaya drag antara sisi *returning blade* dan *advancing blade* semakin besar. Disisi lain, seperti pada pembahasan sebelumnya bahwa pemasangan silinder pengganggu akan menghasilkan putaran dan daya *output* yang lebih besar daripada tidak diberikan pengganggu. Karena putaran dan daya *output* meningkat maka CoP dan TSR yang dihasilkan juga akan meningkat. Selain pengaruh silinder pengganggu, variasi jarak juga memberikan pengaruh terhadap *Tip Speed Ratio* dan *Coefficient of Power* yang dihasilkan oleh turbin *Savonius*. Pada S/D yang dekat dengan sisi *returning blade* akan memberikan pengaruh yang sangat efektif terhadap performa turbin *Savonius*. Pada jarak yang lebih jauh maka silinder pengganggu sudah tidak efektif lagi mengganggu aliran yang melewati sisi *returning blade*. Apabila jarak yang diberikan sangat jauh maka performa yang dihasilkan akan seperti tidak diberikan benda pengganggu.

#### 4.5 Analisa Performa Turbin Angin *Savonius* Berpengganggu dengan S/D sebesar 1,4 dan Variasi Bilangan Reynolds yang Digunakan $4,72 \times 10^4 \leq Re \leq 10^5$

Gambar 4.12 merupakan grafik nilai *Coefficient of Power* yang dihasilkan oleh turbin angin *Savonius* berpengganggu silinder sirkular dengan diameter 12 mm sebagai fungsi nilai *Reynolds number*. Data daya *output* didapatkan dari pengukuran tegangan dan arus listrik yang dihasilkan oleh generator yang dirangkai dengan beban berupa lampu. Poros generator disambung dengan poros turbin menggunakan *flexible joint*. Pengambilan data dilakukan pada konfigurasi S/D = 1,4 karena telah diketahui pada pembahasan sebelumnya bahwa pada konfigurasi S/D = 1,4 didapatkan performa turbin berpenghalang yang paling optimal.



**Gambar 4.12** Grafik *Coefficient of Power* turbin angin *Savonius* berpengganggu sebagai fungsi Re pada S/D = 1,4

Pada pembahasan sebelumnya variasi *Reynolds number* yang diberikan berturut – turut adalah  $6 \times 10^4$ ;  $7,5 \times 10^4$ ; dan  $9 \times 10^4$ . Setelah itu didapatkan bahwa hasil paling optimal dari peforma turbin angin *Savonius* berpengganggu dengan menggunakan

*Reynolds number* sebesar  $6 \times 10^4$ . Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan variasi *Reynolds number* berturut – turut yaitu  $4,72 \times 10^4 \leq Re \leq 10^5$  dengan penambahan sebesar  $0,5 \times 10^4$ . Perluasan variasi *Re* ini dilakukan untuk mengetahui pada nilai *Re* berapa akan didapatkan hasil paling optimal dari performa yang dihasilkan turbin angin. Nilai *Coefficient of Power* dari *Re*=  $4,72 \times 10^4$  sampai dengan *Re*=  $6 \times 10^4$  besarnya selalu meningkat, namun setelah melewati *Re*= $6 \times 10^4$  sampai dengan *Re*= $10^5$  besar nilai *Coefficient of Power* yang dihasilkan selalu turun. Disisi lain, penambahan pengganggu berupa silinder sirkular juga mengakibatkan akan didapatkan nilai *Coefficient of Power* yang sama pada pemberian nilai *Reynolds number* yang berbeda. Nilai *Coefficient of Power* paling besar didapatkan pada *Re*=  $6 \times 10^4$  yaitu sebesar 1,058%. Sedangkan nilai *Coefficient of Power* terkecil didapatkan pada *Re*= $10^5$  yaitu sebesar 0,634%. Pada umumnya semakin besar *Reynolds number* yang diberikan maka daya *input* yang diterima oleh turbin dan daya *output* yang dihasilkan oleh turbin juga akan semakin besar. Namun besar peningkatan daya *input* tidaklah sama dengan besar peningkatan daya *output*. Hal ini yang mengakibatkan nilai *Coefficient of Power* yang didapatkan tidak sebanding dengan peningkatan *Reynolds number* yang diberikan. Hasil paling efisien didapatkan dengan menggunakan *Re* =  $6 \times 10^4$ .

*{Halaman ini sengaja dikosongkan.}*



## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Pada penelitian ini dapat diambil beberapa kesimpulan yaitu sebagai berikut:

- 1) Pemberian pengganggu berupa silinder sirkuler didepan sisi *returning blade* dengan  $(d/D) = 0,2$  terbukti mampu meningkatkan performa yang dihasilkan oleh turbin angin *Savonius*. Hal ini dibuktikan dengan adanya peningkatan pada putaran, torsi statis, dan *Coefficient of Power* jika dibandingkan dengan turbin angin *Savonius* tidak berpengganggu.
- 2) Nilai putaran terbesar didapatkan pada konfigurasi  $S/D=1,4$  dan  $Re=9 \times 10^4$  yaitu 1524,5 RPM. Sedangkan peningkatan paling optimal didapatkan pada konfigurasi  $S/D=1,4$  dan  $Re=9 \times 10^4$  yaitu sebesar 1,596 kali.
- 3) Nilai torsi statis terbesar didapatkan pada konfigurasi  $S/D=1,4$  dan  $Re=9 \times 10^4$  yaitu 2,9 N.cm. Sedangkan peningkatan paling optimal didapatkan pada konfigurasi  $S/D=1,4$  dan  $Re=9 \times 10^4$  yaitu sebesar 1,45 kali.
- 4) Nilai *Coefficient of Power* terbesar didapatkan pada konfigurasi  $S/D=1,4$  dan  $Re=6 \times 10^4$  yaitu 1,059 %. Sedangkan peningkatan paling optimal didapatkan pada konfigurasi  $S/D=1,4$  dan  $Re=6 \times 10^4$  yaitu sebesar 7,27 kali.
- 5) Nilai *Coefficient of Power* terhadap besar *Tip Speed Ratio* didapatkan hasil bahwa nilai CoP berbanding lurus dengan nilai TSR pada  $TSR = 0,3$  sampai dengan  $TSR = 0,6$ , sedangkan nilai CoP maksimum didapatkan sebesar 1,059 % pada TSR sebesar 0,4046.
- 6) Performa turbin angin *Savonius* berpengganggu paling optimal didapatkan pada konfigurasi  $S/D=1,4$  dan  $Re=6 \times 10^4$  yaitu sebesar 1,058 %.

## 5.2 Saran

Pada penelitian ini penulis memiliki beberapa saran yang dapat dilakukan untuk perbaikan kedepannya. Adapun saran tersebut yaitu sebagai berikut:

- 1) Besar dimensi turbin angin *Savonius* terlalu besar jika dibandingkan dengan dimensi *wind tunnel* yang digunakan sehingga memungkinkan terjadinya efek *blockage*. Sebaiknya untuk penelitian kedepannya menggunakan *wind tunnel* yang lebih besar agar *blockage ratio* yang dimiliki masih dalam batas toleransi.
- 2) Perbaiki metode penelitian agar mendapatkan hasil yang lebih akurat.
- 3) Penelitian yang dapat dikembangkan lebih lanjut.

## DAFTAR PUSTAKA

- Deda Altan Burcin, Atilgan Mehmet, and Ozdamar Aydogan. 2008. *An Experimental Study on Improvement of a Savonius Rotor Performance with Curtaining*, Journal Experimental Thermal and Fluid Science, Vol 32, Page Paper 1673-1678.
- Fox, Robert W, Mc Donald and Alan T. 1998. *Introduction to Fluid Mechanics 5th Edition*. John Willey and Son, Inc:New York.
- Lutfi, F.S., G. Nugroho, A. Musyafa. 2013. *Rancang Bangun Turbin Angin Vertikal Jenis Savonius dengan Variasi Jumlah Stage dan Phase Shift Angle untuk Memperoleh Daya Maksimum*. Jurnal Teknik POMITS, Vol 1, No. 1, Hal. 1-5
- Mohamed MH, Janiga G, Pap E, and Thevenin D. 2010. *Optimization of Savonius Turbines Using an Obstacle Shielding the Returning Blade*, Journal Renewable Energy, Vol 35, Page Paper 2618-2626.
- Sargolzhay, J. 2007. *Prediction of the Power Ratio in Wind Turbine Savonius Rotors Using Artificial Neural Networks*. Zahedan: Baluchestan University.
- Triyogi, Y, D. Suprayogi, dan E. Spirda. 2009. *Reducing the Drag on a Cylinder by Upstream Installation of an I Type Bluff Body as Passive Control*, Journal Mechanical Engineering Science, Vol 223 Part C, Page Paper 2291- 2296.
- Tsutsui, T and Igarashi, T. 2002. *Drag Reduction on Circular Cylinder in an Air-Stream*, Journal of Wind Engineering And Industrial Aerodynamic, Vol 90, Page Paper 527-541.
- White F.M. 1988. *Mekanika Fluida*, Jilid 2, Edisi Kedua. Jakarta: Penerbit Erlangga.

*{Halaman ini sengaja dikosongkan.}*

## LAMPIRAN

TABEL DATA STANDAR (TANPA PENGANGGU)

Re	n (RPM)	T (N.cm)	CoP	CoP (%)	TSR
$6 \times 10^4$	554	1.6	0.001457	0.15	0.28
$7,5 \times 10^4$	778	1.8	0.002872	0.29	0.33
$9 \times 10^4$	955	2	0.002971	0.30	0.34

TABEL DATA PUTARAN

S/D	n (RPM)			n/n <sub>o</sub>		
	Re: $6 \times 10^4$	Re: $7,5 \times 10^4$	Re: $9 \times 10^4$	Re: $6 \times 10^4$	Re: $7,5 \times 10^4$	Re: $9 \times 10^4$
1.2	642.78	974.84	1343	1.160253	1.253008	1.406283
1.3	653.32	1014.1	1431.3	1.179278	1.30347	1.498743
1.4	752.56	1124.9	1524.5	1.358412	1.445887	1.596335
1.5	735.74	1112.8	1505.8	1.328051	1.430334	1.576754
1.6	730.59	1104.4	1488.2	1.318755	1.419537	1.558325
1.7	711.645	1084.3	1470	1.284558	1.393702	1.539267
1.8	692.7	1064.2	1450.2	1.250361	1.367866	1.518534
1.9	672.2	1045.8	1428.5	1.213357	1.344216	1.495812
2	651.9	1027.6	1407.6	1.176715	1.320823	1.473927
2.1	631.27	1009.3	1385.6	1.139477	1.297301	1.45089

TABEL DATA TORSI STATIS

S/D	T (N.cm)			T/T <sub>o</sub>		
	Re: $6 \times 10^4$	Re: $7,5 \times 10^4$	Re: $9 \times 10^4$	Re: $6 \times 10^4$	Re: $7,5 \times 10^4$	Re: $9 \times 10^4$
1.2	1.8	2.1	2.5	1.125	1.167	1.250
1.3	1.9	2.2	2.7	1.188	1.222	1.350
1.4	2	2.3	2.9	1.250	1.278	1.450
1.5	1.9	2	2.8	1.188	1.111	1.400

1.6	1.8	2	2.7	1.125	1.111	1.350
1.7	1.8	1.95	2.6	1.125	1.083	1.300
1.8	1.7	1.9	2.3	1.063	1.056	1.150
1.9	1.7	1.9	2.3	1.063	1.056	1.150
2	1.7	1.9	2.2	1.063	1.056	1.100
2.1	1.7	1.9	2.2	1.063	1.056	1.100

TABEL DATA *COEFFICIENT OF POWER*➤  $Re = 6 \times 10^4$ 

S/D	Tegangan (Volt)	Kuat Arus (A)	n (dibebani)	Pout (mW)	Pout (W)	Pin (W)	CoP (%)
std	1.44	0.0035	452	5.040	0.005040	3.46	0.145737
1.2	1.39	0.0225	539	31.275	0.031275	3.46	0.904352
1.3	1.41	0.0228	543	32.148	0.032148	3.46	0.929595
1.4	1.42	0.0258	644	36.636	0.036636	3.46	1.059371
1.5	1.4	0.0256	627	35.840	0.035840	3.46	1.036354
1.6	1.39	0.0256	621	35.584	0.035584	3.46	1.028951
1.7	1.44	0.0240	604	34.560	0.034560	3.46	0.999341
1.8	1.42	0.0237	586	33.654	0.033654	3.46	0.973143
1.9	1.41	0.0232	568	32.712	0.032712	3.46	0.945904
2	1.46	0.0217	547	31.682	0.031682	3.46	0.91612
2.1	1.43	0.0215	522	30.745	0.030745	3.46	0.889026

➤  $Re = 7,5 \times 10^4$ 

S/D	Tegangan (Volt)	Kuat Arus (A)	n (dibebani)	Pout (mW)	Pout (W)	Pin (W)	CoP (%)
std	1.47	0.0132	648	19.404	0.019404	6.74	0.287864
1.2	1.43	0.0332	836	47.476	0.047476	6.74	0.704319
1.3	1.45	0.0340	874	49.300	0.049300	6.74	0.731379
1.4	1.46	0.0382	986	55.772	0.055772	6.74	0.827393

1.5	1.48	0.0366	963	54.168	0.054168	6.74	0.803597
1.6	1.42	0.0378	954	53.676	0.053676	6.74	0.796298
1.7	1.41	0.0374	921	52.734	0.052734	6.74	0.782323
1.8	1.44	0.0359	915	51.696	0.051696	6.74	0.766924
1.9	1.46	0.0348	905	50.808	0.050808	6.74	0.753751
2	1.48	0.0338	894	50.024	0.050024	6.74	0.74212
2.1	1.45	0.0338	886	49.010	0.049010	6.74	0.727077

➤  $Re = 9 \times 10^4$

S/D	Tegangan (Volt)	Kuat Arus (A)	n (dibebani)	Pout (mW)	Pout (W)	Pin (W)	CoP (%)
std	1.42	0.0244	806	34.648	0.034648	11.66	0.297191
1.2	1.43	0.0471	1154	67.353	0.067353	11.66	0.577717
1.3	1.47	0.0502	1217	73.794	0.073794	11.66	0.632964
1.4	1.51	0.0533	1369	80.483	0.080483	11.66	0.690339
1.5	1.44	0.0545	1342	78.480	0.078480	11.66	0.673158
1.6	1.41	0.0536	1251	75.576	0.075576	11.66	0.648249
1.7	1.46	0.0505	1242	73.730	0.073730	11.66	0.632415
1.8	1.45	0.0501	1237	72.645	0.072645	11.66	0.623109
1.9	1.44	0.0497	1214	71.568	0.071568	11.66	0.613871
2	1.41	0.0500	1201	70.500	0.070500	11.66	0.60471
2.1	1.43	0.0486	1178	69.498	0.069498	11.66	0.596116

TABEL DATA PENINGKATAN *COEFFICIENT OF POWER*

S/D	CoP/CoP <sub>o</sub>		
	Re:6x10 <sup>4</sup>	Re:7,5x10 <sup>4</sup>	Re:9x10 <sup>4</sup>
1.2	6.205357143	2.446712018	1.9439217
1.3	6.378571429	2.540713255	2.1298199
1.4	7.269047619	2.874252731	2.3228758
1.5	7.111111111	2.791589363	2.2650658
1.6	7.06031746	2.766233766	2.1812514
1.7	6.857142857	2.717687075	2.1279728
1.8	6.677380952	2.66419295	2.0966578
1.9	6.49047619	2.61842919	2.0655738
2	6.286111111	2.578025149	2.0347495
2.1	6.100198413	2.525767883	2.0058301

TABEL DATA *TIP SPEED RATIO*

S/D	TSR		
	Re:6x10 <sup>4</sup>	Re:7,5x10 <sup>4</sup>	Re:9x10 <sup>4</sup>
std	0.283963156	0.325899547	0.337700201
1.2	0.338619781	0.42045065	0.483506244
1.3	0.341132729	0.439562043	0.509902165
1.4	0.404584673	0.49589036	0.573587563
1.5	0.393904643	0.484322937	0.562275025
1.6	0.390135221	0.479796555	0.524147583
1.7	0.379455191	0.463199819	0.520376737
1.8	0.368146923	0.46018223	0.518281823
1.9	0.356838656	0.455152916	0.508645217
2	0.343645678	0.449620671	0.503198439
2.1	0.327939751	0.44559722	0.493561833



TABEL DATA *COEFFICIENT OF POWER* PADA S/D= 1,4

U (m/s)	Re	Tegangan (Volt)	Kuat Arus (mA)	Pout (mW)	Pout (W)	Pin (W)	CoP (%)
6.94	47200	1.41	10.73	15.1293	0.015129	1.6790218	0.901078
7.36	50000	1.41	13.09	18.4569	0.018457	2.002679	0.92161
8.09	55000	1.4	18.55	25.97	0.025970	2.6596438	0.976447
8.83	60000	1.42	25.77	36.5934	0.036593	3.458279	1.058139
9.56	65000	1.43	29.06	41.5558	0.041556	4.3888586	0.946848
10.3	70000	1.44	33.58	48.3552	0.048355	5.4889539	0.880955
11.03	75000	1.46	38.16	55.7136	0.055714	6.7406915	0.826526
11.77	80000	1.46	44.94	65.6124	0.065612	8.1904412	0.801085
12.5	85000	1.48	51.12	75.6576	0.075658	9.8108797	0.77116
13.24	90000	1.51	53.26	80.4226	0.080423	11.658478	0.689821
13.98	95000	1.51	60.76	91.7476	0.091748	13.724591	0.668491
14.71	100000	1.52	66.69	101.3688	0.101369	15.988802	0.633999

*{Halaman ini sengaja dikosongkan.}*

## BIODATA PENULIS



Penulis yang mempunyai nama lengkap **Adhi Hertamtomo Putro**, atau sejak kecil dikenal dengan Adhi ini dilahirkan di Surakarta pada tanggal 11 Mei 1994. Penulis merupakan anak pertama dari empat bersaudara. Pendidikan formal yang telah ditempuh yaitu SDN Purwotomo 97 Surakarta (2000-2006), SMPN 3 Surakarta (2006-2009), SMAN 7 Surakarta (2009-2012). Selepas SMA penulis melanjutkan studinya di Jurusan S1 Teknik Mesin FTI-ITS Surabaya. Penulis pernah melakukan kerja praktek di PT. DIRGANTARA INDONESIA (IAe), Bandung bagian *Aircraft Maintenance Services* (ACS) selama 1 bulan. Serta dalam studinya penulis mendapatkan beasiswa bidik misi selama 3 tahun. Penulis aktif di organisasi mahasiswa jurusan. Pada saat kuliah ia aktif sebagai pengurus di Lembaga Bengkel Mahasiswa Mesin ITS. Pada saat semester 7 penulis menjabat sebagai Ketua Lembaga Bengkel Mahasiswa Mesin ITS.

Jika ada informasi, pertanyaan maupun saran yang ingin disampaikan kepada Penulis, silakan menyampaikan melalui email [adhihertamtomo@gmail.com](mailto:adhihertamtomo@gmail.com).